



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DEL MALLADO DE UN MODELO DE UN EJE FISURADO

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Javier Montero García

Tutora: M^a Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre

Leganés, Julio de 2013

Resumen

La aparición y propagación de fisuras en ejes rotatorios es un tema de gran importancia debido a las graves consecuencias que pueden provocar la rotura de estos elementos mecánicos.

Uno de los parámetros que estudia la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (MFEL) es el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en el frente de fisura.

En el presente trabajo, se reduce el tiempo computacional de un modelo de eje fisurado que presenta distintas profundidades de fisura y se encuentra en régimen estático, con el objetivo de que sea usado en futuros trabajos que se realicen en régimen dinámico, el cual incrementa en gran medida el tiempo de cálculo. Para ello, se realizarán pruebas con distintas mallas comparando los resultados obtenidos del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), con otro trabajo realizado previamente.

Para la realización de este proyecto, se hará uso del programa de elementos finitos ABAQUS.

Palabras clave: Eje fisurado, Factor de Intensidad de Tensiones, mallado.

Abstract

The appearance and the propagation of cracks in rotating shafts is a major issue because of the serious consequences that can cause the breaking of these mechanical elements.

One of the parameters that the Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) studies, is the Stress Intensity Factor (SIF) at the crack front.

In this paper, it is reduced the computational time of a cracked shaft model that presents different crack depths and is in static conditions, with the aim of being used in future works to be performed in dynamic conditions, which increases in much computation time. To do so, it will be tested with different meshes comparing the results of the Stress Intensity Factor (SIF), with other work done previously.

To carry out this project, it will use the ABAQUS finite element program.

Keywords: Shaft cracked, Stress Intensity Factor, mesh.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Índice de contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
Índice de figuras	5
Índice de tabla.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Motivación	8
1.2. Objetivo	9
1.3. Estructura del documento.....	9
2. ESTUDIO TEÓRICO	11
2.1. Mecánica de la fractura.....	11
2.1.1. Mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL).....	11
2.1.1.1. Factor de Intensidad de Tensiones (FIT).....	12
2.1.1.2. Parámetros de fisura.....	12
2.1.1.3. Modos de fractura.....	13
2.1.1.4. Tensiones y desplazamientos en el frente de fisura.....	14
2.1.1.5. Tenacidad de la fractura.....	16
3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	17
3.1. Conceptos básicos	17
3.2. Introducción a ABAQUS.....	18
4. MODELO NUMÉRICO.....	20
4.1. Módulo “PART”	20
4.2. Módulo “PROPERTY”	22
4.3. Módulo “ASSEMBLY”	22
4.4. Módulo “STEP”	23
4.5. Módulo “INTERACTION”	23
4.6. Módulo “LOAD”	25
4.7. Módulo “MESH”	25

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

5. PROCEDIMIENTO	26
5.1. Casos propuestos	28
5.1.1. Caso 1	28
5.1.2. Caso 2	31
5.1.3. Caso 3	32
5.1.4. Caso 4	33
5.1.5. Caso 5	34
5.1.6. Resumen del mallado en cada uno de los casos	36
5.2. Comparación de casos	38
6. RESULTADOS	40
6.1. Cálculo del FIT a partir de la herramienta crack	40
6.2. Cálculo del FIT para el caso 4	40
6.3. Cálculo del FIT para el caso 5	44
6.4. Comparación de resultados	48
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	55
7.1. Conclusiones	55
7.2. Trabajos futuros	55
8. PRESUPUESTO	56
BIBLIOGRAFÍA	57

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Índice de figuras

Figura 1. 1.- Fallo por rotura en ejes [1].....	8
Figura 2. 1.- Parámetros de fisura.....	12
Figura 2. 2.- Modos de Fractura [6].....	14
Figura 2. 3.- Tensor de tensiones extremo de la fisura [7].	15
Figura 4. 1.- Esquema del modelo.....	20
Figura 4. 2.- Particiones en la sección del eje.	21
Figura 4. 3.- Particiones en la longitud del eje.....	21
Figura 4. 4.- Detalle de la partición en la sección de la fisura.....	22
Figura 4. 5.- Restricción e interacción para $\alpha=0.5$ (izquierda) y $\alpha=0.1$ (derecha).....	24
Figura 4. 6.- Crack que define el frente de fisura para una profundidad de fisura de $\alpha=0.5$ (izquierda) y $\alpha=0.4$ (derecha).....	24
Figura 4. 7.- Apoyo en un extremo del eje.....	25
Figura 5. 1.- Ejemplo mallado de la sección.....	27
Figura 5. 2.- Particiones en la zona longitudinal de la mitad del eje. Caso (1, 2, 3, 4 y 5).	27
Figura 5. 3.- Particiones en la zona de la sección del eje (Caso1, 2, 3 y 4).....	28
Figura 5. 4.- Mallado zona de la sección. Caso 1.....	29
Figura 5. 5.- Mallado zona longitudinal. Caso 1.	30
Figura 5. 6.- Mallado zona longitudinal. Trabajo de Referencia [2].....	30
Figura 5. 7.- Mallado zona de la sección. Caso 2.....	31
Figura 5. 8.- Mallado zona longitudinal. Caso 2.	32
Figura 5. 9.- Mallado zona de la sección. Caso 3.....	33
Figura 5. 10.- Particiones en la zona de la sección. Caso 4.	33
Figura 5. 11.- Mallado zona de la sección. Caso 4.....	34
Figura 5. 12.- Mallado zona de la sección. Caso 5.....	35
Figura 5. 13.- Mallado en la zona longitudinal. Caso5.	35
Figura 5. 14.- Resumen mallado en la sección.....	37
Figura 6. 1.- Esquema posición relativa del frente de fisura (caso 4).	41

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Figura 6. 2.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.5$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	42
Figura 6. 3.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.4$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	42
Figura 6. 4.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.3$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	43
Figura 6. 5.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.2$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	43
Figura 6. 6.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.1$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	44
Figura 6. 7.- Esquema posición relativa del frente de fisura (caso 5).	45
Figura 6. 8.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.5$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	46
Figura 6. 9.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.4$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	46
Figura 6. 10.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.3$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	47
Figura 6. 11.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.3$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	47
Figura 6. 12.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.1$ (Izquierda). Mallado en la sección (derecha).	48
Figura 6. 13.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha = 0.5$	49
Figura 6. 14.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha = 0.4$	50
Figura 6. 15.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha = 0.3$	51
Figura 6. 16.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha = 0.2$	52
Figura 6. 17.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha = 0.1$	53

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Índice de tabla

Tabla 5. 1.- Resumen del mallado longitudinal.....	36
Tabla 5. 2.- Comparación del número de elementos y tiempo de cálculo en los 5 casos analizados.....	38
Tabla 5. 3.- Comparación de los desplazamientos en el eje Y y error cometido con respecto el trabajo de referencia.....	38
Tabla 6. 1.- FIT de cada una de las profundidades de fisura para el caso 4.....	41
Tabla 6. 2.- FIT de cada una de las profundidades de fisura para el caso 5.....	45
Tabla 6. 3.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.5$	49
Tabla 6. 4.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.4$	50
Tabla 6. 5.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.3$	51
Tabla 6. 6.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.2$	52
Tabla 6. 7.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.1$	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La aparición de defectos en componentes mecánicos es un tema de gran importancia, debido a que un fallo en servicio puede provocar cualquier tipo de accidente, además de elevar los costes. Algunos de los comportamientos mecánicos de estos componentes pueden verse modificados por la aparición de fisuras. Esto provoca principalmente una disminución en la rigidez del componente y un cambio en su comportamiento estático y dinámico, lo que supone una reducción en el tiempo de vida en servicio.

Un eje es un elemento cilíndrico que transmite un movimiento de giro y que puede llevar montado distintos elementos mecánicos de transmisión de potencia.

Los ejes son elementos mecánicos muy usados en todo tipo de máquinas industriales, así como en toda clase de vehículos. Estos elementos mecánicos están sometidos a cargas de flexión, tracción, compresión y torsión, que pueden actuar de forma combinada o individualmente. Estos tipos de cargas acaban generando deterioros en el eje, pudiendo provocar roturas por fatiga (estudio dinámico) o debido a cargas estáticas.

Uno de los posibles fallos que pueden ocasionarse en un eje es la aparición de fisuras en el plano perpendicular a la directriz de dicho eje. La aparición de este tipo de fallo provoca un mal funcionamiento del eje e incluso puede provocar su completa rotura (Figura 1.1).



Figura 1. 1.- Fallo por rotura en ejes [1].

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

El estudio del comportamiento de los ejes es de vital importancia para obtener un gran control de predicción de fallos en máquinas y establecer las consecuencias que estos producirían. Por ello, numerosos investigadores estudian el comportamiento de dichos elementos mecánicos, así como la propagación de fisuras, con el objetivo de poder prevenir este tipo de fallos en un futuro.

Con el propósito de seguir en esta dirección, en el trabajo que se presenta a continuación, se realiza un análisis de un eje fisurado en régimen estático, mediante el programa de elementos finitos ABAQUS.

1.2. Objetivo

El objetivo de este proyecto, consiste en reducir el tiempo computacional, mediante el programa de elementos finitos ABAQUS, de un modelo de eje que presenta distintas profundidades de fisura y se encuentra en régimen estático. De este modo, dicho modelo podrá ser usado en trabajos futuros que impliquen un régimen dinámico, el cuál implicará un mayor tiempo cálculo.

Para conseguir dicho objetivo se realizarán pruebas con distintas mallas comparando los resultados obtenidos del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), con otros trabajos realizado anteriormente [2].

1.3. Estructura del documento

Este documento se divide en nueve capítulos. El primero consiste en una introducción del proyecto, donde se explica la motivación y objetivos que llevan a realizarlo. En el segundo capítulo, se realiza una breve explicación teórica de la Mecánica de la Fractura y el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT). El tercer capítulo introduce unos conocimientos breves del programa de elementos finitos ABAQUS, con el que se realizarán todos los ensayos del proyecto. El cuarto capítulo, muestra el modelo numérico del problema, donde se introduce el enunciado de este y los distintos pasos realizados en ABAQUS para llevar a cabo su simulación. El quinto capítulo, presenta el procedimiento de estudio llevado a cabo, así como algunos ensayos característicos, descartando alguno de ellos basándose en resultados obtenidos. El

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

sexto capítulo, expone y explica los resultados obtenidos en los ensayos válidos del capítulo anterior, comparándolos con los del trabajo de referencia [2]. En el séptimo capítulo se realiza una explicación de las conclusiones finales del proyecto y se exponen posibles trabajos futuros. El octavo capítulo, presenta el presupuesto necesario para llevar a cabo dicho proyecto. Finalmente, en el noveno capítulo, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas en este trabajo.

2. ESTUDIO TEÓRICO

2.1. Mecánica de la fractura

Las ecuaciones constitutivas de la teoría de la elasticidad, usadas para predecir el fallo de sólidos sin imperfecciones, son de poco uso en problemas como el que se plantea en este trabajo. En casos como este, donde aparecen sólidos que presentan defectos o fisuras, las ecuaciones constitutivas de la teoría de la elasticidad no tienen en cuenta el fenómeno de concentración de tensiones en los extremos de una grieta. Debido a esto, es necesario usar los principios de la Mecánica de la Fractura.

La Mecánica de la Fractura [3] es una disciplina nacida a principios del siglo XX. Parte de una fuerte base teórica hasta lograr alcanzar importantes aplicaciones de tipo práctico. El objetivo principal de la Mecánica de la Fractura consiste en el estudio de la estabilidad estructural de materiales, considerando la existencia de defectos de cualquier tipo de origen, hasta definir las condiciones o criterios de rotura.

Existen teorías más concretas relacionadas con la Mecánica de la Fractura, centradas en el estudio y predicción de rotura de materiales frágiles con ausencia prácticamente de plasticidad. Esta teoría se denomina Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL), y será la que se usará en el presente trabajo.

2.1.1. Mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL)

El objetivo principal de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) consiste en explicar y predecir la rotura de materiales frágiles poco plásticos.

La MFEL se basa en el criterio de Griffith [4] propuesto en 1920 y desarrollado posteriormente por Irwin en 1957 [5].

El principio de la Mecánica de la Fractura indica que todos los procesos de fractura tienen lugar en una pequeña zona cercana al frente de la fisura, mientras que el resto del sólido mantiene un comportamiento elástico lineal. Los campos de tensiones generados en las proximidades de dicha fisura están caracterizados por el parámetro K , Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), y

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

este está relacionado con la tensión normal aplicada sobre la estructura (σ) y el tamaño de la fisura (a).

2.1.1.1. Factor de Intensidad de Tensiones (FIT)

El Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), es fundamental para calcular el crecimiento de fisuras debido a fatiga. Es un parámetro que caracteriza localmente los campos de tensiones y desplazamientos en la fisura. En definitiva, se puede interpretar como una medida de la intensidad del campo tensional en el fondo de la fisura.

2.1.1.2. Parámetros de fisura

Los parámetros que intervienen e influyen en el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en una zona fisurada, de un sólido de geometría cilíndrica son los siguientes: (Figura 2.1)

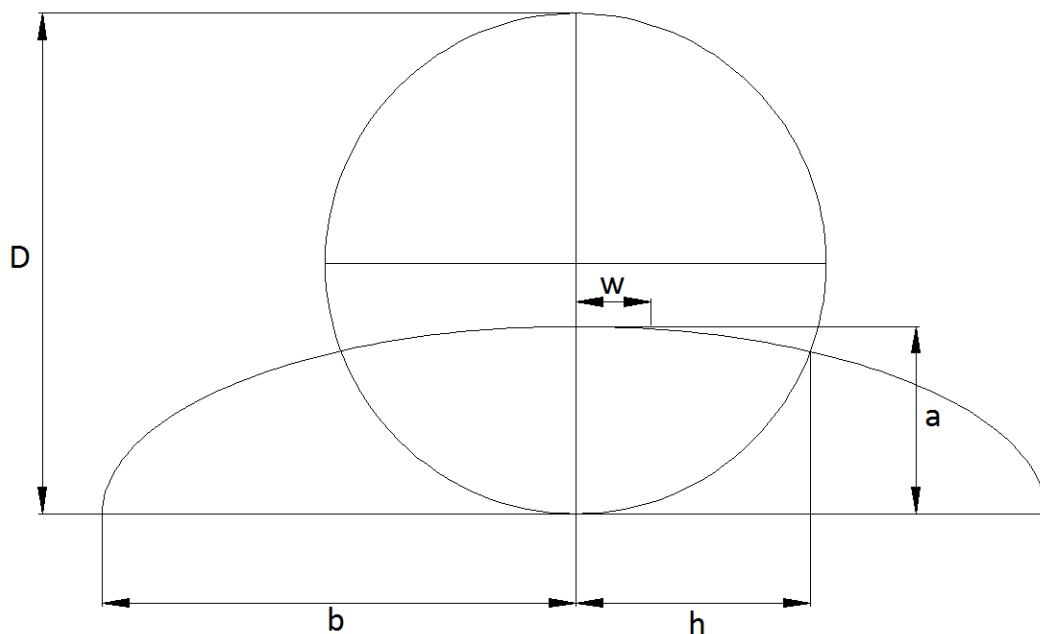


Figura 2. 1.- Parámetros de fisura.

- Longitud característica de la fisura α : determina la profundidad de la fisura.

$$\alpha = \frac{a}{D}$$

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

- Factor de forma de la fisura β : toma valores comprendidos entre 0 y 1. Si $\beta=0$ las fisuras son de frente recto, si $\beta=1$ las fisuras son de frente semicircular.

$$\beta = \frac{a}{b}$$

- Posición relativa en el frente de fisura γ :

$$\gamma = \frac{w}{h}$$

El estudio que se realizará en este trabajo se centrará en geometrías cuyos factores de forma son $\beta=0$. Además se analizarán cinco profundidades diferentes de fisura: $\alpha=0.5$, $\alpha=0.4$, $\alpha=0.3$, $\alpha=0.2$ y $\alpha=0.1$.

2.1.1.3. Modos de fractura

En sólidos elásticos que presentan fisuras, es necesario diferenciar los distintos tipos de movimientos relativos que pueden presentar los labios que conforman dicha grieta. Así pues, se definen tres tipos de Modos de fractura, los cuales se representan en la figura 2.2:

- Modo I: Modo de apertura. Los esfuerzos de tensión son perpendiculares a la fisura, provocando una separación entre los labios de la grieta. Tienen un desplazamiento en sentido opuesto.
- Modo II: Modo de cortadura. Los esfuerzos son paralelos a las caras de la fisura, perpendiculares al frente de fisura y con sentidos opuestos entre sí. Los desplazamientos entre labios son paralelos pero en sentido opuesto.
- Modo III: Modo de cizalladura. Los esfuerzos están aplicados paralelos a las caras y al frente de fisura, pero con sentidos opuestos. Los desplazamientos entre labios son paralelos al frente de fisura y en sentido contrario entre sí.

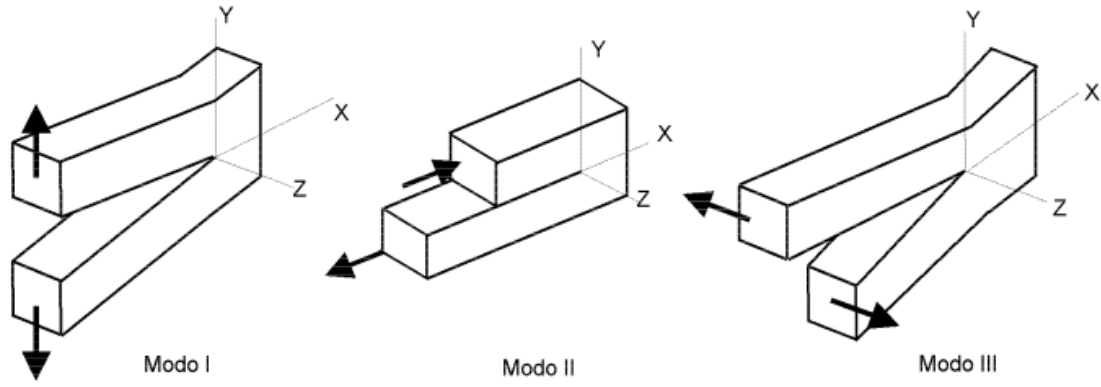


Figura 2. 2.- Modos de Fractura [6].

En cualquier problema pueden darse dichos modos, apareciendo de manera individual o como combinación de ambos, dando lugar a tres factores de intensidad de tensiones, K_I , K_{II} y K_{III} . Sin embargo, la mayoría de fallos en componentes mecánicos se deben a desplazamientos correspondientes al modo de apertura, Modo I.

2.1.1.4. Tensiones y desplazamientos en el frente de fisura

El campo de tensiones y desplazamientos en la zona de una fisura que se propaga siguiendo el modo de apertura (ver figura 2.3), están dados por las ecuaciones 2.1-2.5 [7]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (2.2)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} (k - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}) \\ \sin \frac{\theta}{2} (k + 1 + \cos^2 \frac{\theta}{2}) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$u_z = 0 \quad (2.5)$$

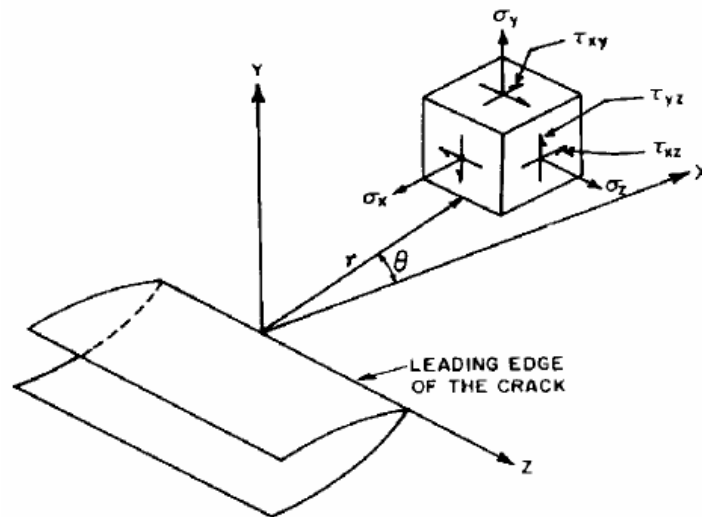


Figura 2. 3.- Tensor de tensiones extremo de la fisura [7].

Siendo:

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ y τ_{yz} las componentes del tensor de tensiones.
- u_x, u_y y u_z , los desplazamientos en las direcciones x, y y z .
- r y θ , las coordenadas polares.
- K_I , el FIT en Modo I.
- ν , coeficiente de Poisson.
- μ , módulo de elasticidad transversal.

Un aspecto fundamental del FIT, es la relación que se establece entre los campos de tensión locales en la zona próxima a la fisura, con la tensión nominal aplicada a la estructura, lejos de la fisura.

Para conseguir que σ_{yy} sea máxima, se debe tomar $\theta=0$:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.6)$$

Despejando el factor K_I , resulta:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (2.7)$$

De la ecuación 2.6, se puede deducir que un aumento de r (alejamiento del frente de fisura) provoca una disminución en σ_{yy} , manteniendo el factor de intensidad de tensiones K_I constante. Por lo tanto, K_I describe el campo de esfuerzos alrededor de una fisura en cualquier elemento estructural.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

De la expresión 2.7 también se puede observar que el FIT debe ser directamente proporcional a la tensión nominal aplicada, σ , y a la raíz cuadrada de la longitud de la fisura (a), por lo que la forma general de expresar el FIT es:

$$K_I = F_I \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

Siendo:

- F_I , el factor de corrección adimensional que depende de la geometría de la fisura.

2.1.1.5. Tenacidad de la fractura

La MFEL establece que la fisura se propagará de forma inestable cuando el FIT alcance un valor crítico, K_{IC} . Este valor se corresponde con la denominada tenacidad a la fractura.

Así pues el criterio local de fractura en Modo I queda determinado de la siguiente manera:

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2.9)$$

En conclusión, el conocimiento de la tenacidad de fractura y del factor de intensidad de tensiones en un elemento estructural fisurado, permiten predecir su fractura cuando se produce en régimen elástico, es decir, cuando es frágil.

3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1. Conceptos básicos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una de las herramientas más usadas hoy en día en la resolución de problemas de ingeniería, debido a su gran potencia de cálculo. Esta herramienta presenta numerosas ventajas entre las que destacan que permite resolver problemas que serían muy difíciles de llevar a cabo por métodos matemáticos tradicionales y que supone un ahorro económico y de tiempo importante.

El principio de funcionamiento de este método es la llamada discretización del modelo, que consiste en transformar los modelos y cuerpos continuos en modelos discretos aproximados. Por ello, no hay que olvidar que los resultados obtenidos con el MEF son una aproximación de la realidad, sin llegar a serlo, aunque el modelo simulado se acerque bastante al diseño óptimo.

El MEF divide el cuerpo o pieza en un número finito de elementos que se encuentran interconectados entre ellos por medio de unos puntos llamados nodos. Los elementos son pequeñas partes a las que se les asigna de forma individual las propiedades del material que constituye la pieza y las ecuaciones que rigen su comportamiento.

Un sistema continuo complejo está gobernado por sistema de ecuaciones diferenciales. Gracias a la discretización que realiza el MEF, se pasa a tener un sistema de ecuaciones lineales o no lineales, mucho más fácil de resolver.

Las etapas de análisis del método de elementos finitos son las que se describen a continuación:

- **Preproceso:** en esta primera etapa se crea el modelo que va a ser simulado. Para ello, es necesario:
 - Seleccionar el tipo de elemento finito.
 - Introducir las constantes reales.
 - Seleccionar el modelo de material e introducir sus constantes.
 - Generar la geometría.
 - Aplicar las condiciones de contorno (restricciones de movimiento, cargas...).
 - Generar la malla.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

- **Resolución:** esta etapa comprende la realización de los cálculos y la generación de soluciones. Se debe especificar el tipo de cálculo a realizar, el número de iteraciones, la configuración de los parámetros de cálculo...
- **Postproceso:** en esta última etapa se presentan los resultados de forma gráfica y numérica.

3.2. Introducción a ABAQUS

ABAQUS [8] es uno de los programas de Método de Elementos Finitos que más se utiliza en el ámbito de la ingeniería. Este programa permite resolver tanto problemas de resistencia de materiales, como de mecánica de la fractura, procesos de conformado de materiales, transferencia de calor...

En este trabajo se utiliza la interfaz ABAQUS/Cae, que permite la creación de los modelos de elementos finitos y analizar los resultados de la simulaciones realizadas en ABAQUS/Standard y ABAQUS/Explicit. Los análisis en ABAQUS/Standard son de propósito general e incluyen todas las posibilidades de análisis excepto el análisis dinámico. Se utiliza ABAQUS/Explicit para la resolución de problemas de tipo dinámico.

Para la creación del modelo, ABAQUS/Cae cuenta con una serie de módulos que se describen brevemente a continuación:

- **Part:** en primer lugar se define la geometría de las piezas que componen el modelo, creando cada una de ellas en partes diferentes.
- **Property:** en este módulo, se definen las propiedades de los materiales de las distintas piezas que constituyen el modelo.
- **Assembly:** aquí se ensamblan todas las piezas que conforman el modelo.
- **Step:** se definen los pasos en los que se quiere que se divida el proceso.
- **Interaction:** permite especificar las interacciones mecánicas o térmicas entre las distintas piezas del modelo, o entre el modelo y sus alrededores.
- **Load:** este módulo permite definir las condiciones de contorno del problema a resolver. Se definen condiciones de contorno como el estado de cargas y los apoyos del sistema.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

- **Mesh**: en este módulo se malla el modelo.
- **Job**: aquí se crea el trabajo de análisis y se puede seguir en todo momento la progresión de este.
- **Visualization**: por último, este módulo permite la visualización de todos los resultados.

4. MODELO NUMÉRICO

El modelo está compuesto por un eje cilíndrico biapoyado de 900 mm de longitud y 20 mm de diámetro. Como se puede ver en la Figura 4.1, este se encuentra sometido a dos cargas puntuales de 100 N, situadas a 223 mm de cada apoyo. El eje presenta una fisura de frente recto en su parte central. La profundidad de esta fisura se irá variando como se indica más adelante. El material elegido es aluminio, cuyas características son las siguientes:

Densidad: 2800 kg/m^3 .

Módulo de Elasticidad: 72 GPa.

Coefficiente de Poisson: 0.33.

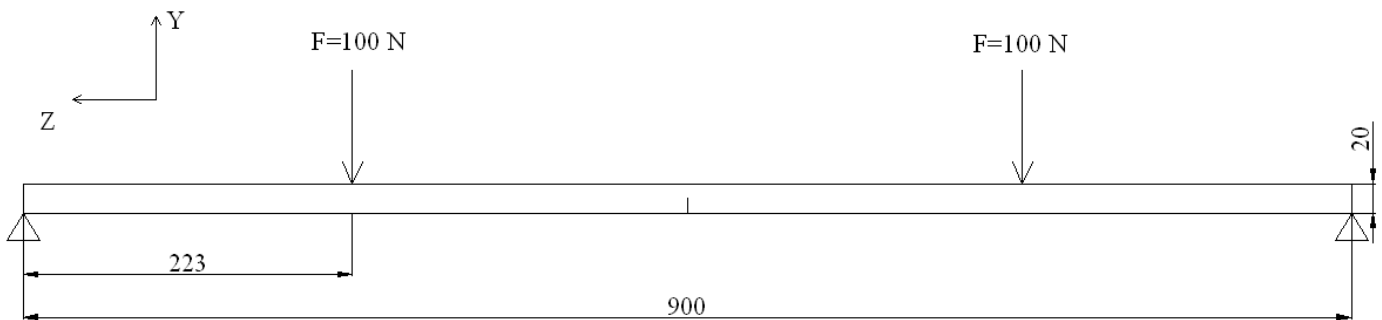


Figura 4. 1.- Esquema del modelo.

A continuación, se describirán los pasos para construir el modelo en ABAQUS:

4.1. Módulo “PART”

En este módulo se define la geometría del modelo a estudiar. Para ello se crea un cilindro mediante extrusión de 450 mm de longitud y 20 mm de diámetro. Este cilindro se corresponde con la mitad del eje del modelo, que después será copiado para formar el eje completo.

Para poder definir las cargas, el mallado y la profundidad de la fisura, es necesario realizar una serie de particiones en la longitud y la sección del eje. En las figuras 4.2 y 4.3, se muestran las particiones realizadas en uno de los casos a analizar a modo de ejemplo. Las particiones de cada caso analizado se explicarán con más detalle en el apartado de procedimiento.

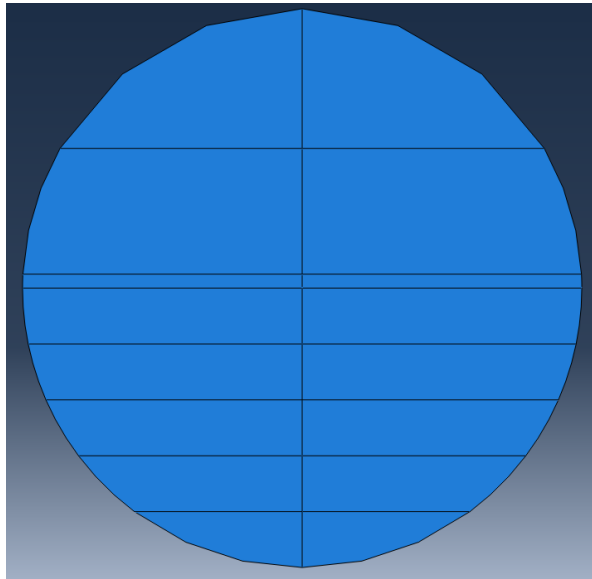


Figura 4. 2.- Particiones en la sección del eje.

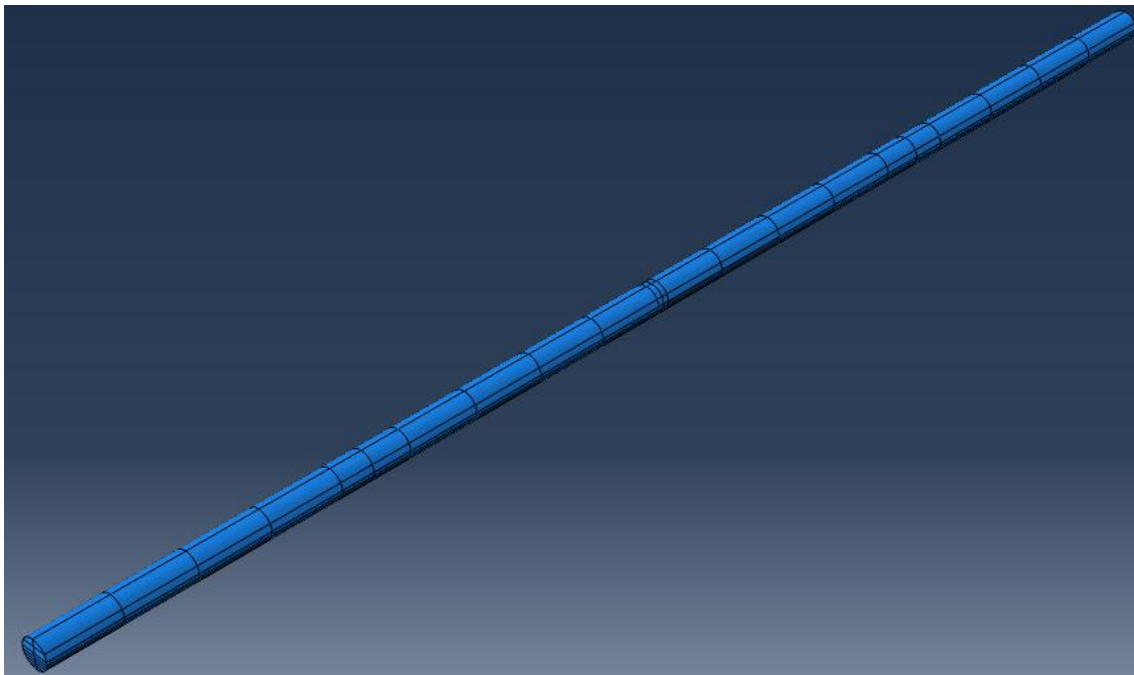


Figura 4. 3.- Particiones en la longitud del eje.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de este trabajo consiste en la optimización del mallado de un modelo dado, con el fin de disminuir el tiempo de cálculo para poder realizar futuros análisis en casos dinámicos. Por tanto, las particiones de este modelo variarán según el mallado a estudiar.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Independientemente de estas variaciones, en todos los casos se realiza una partición a 4 mm del extremo derecho, es decir, a 4 mm del futuro centro del eje, con el fin de obtener un mallado más fino en la zona próxima a la fisura. En la figura 4.4 se puede ver esta partición con más detalle.

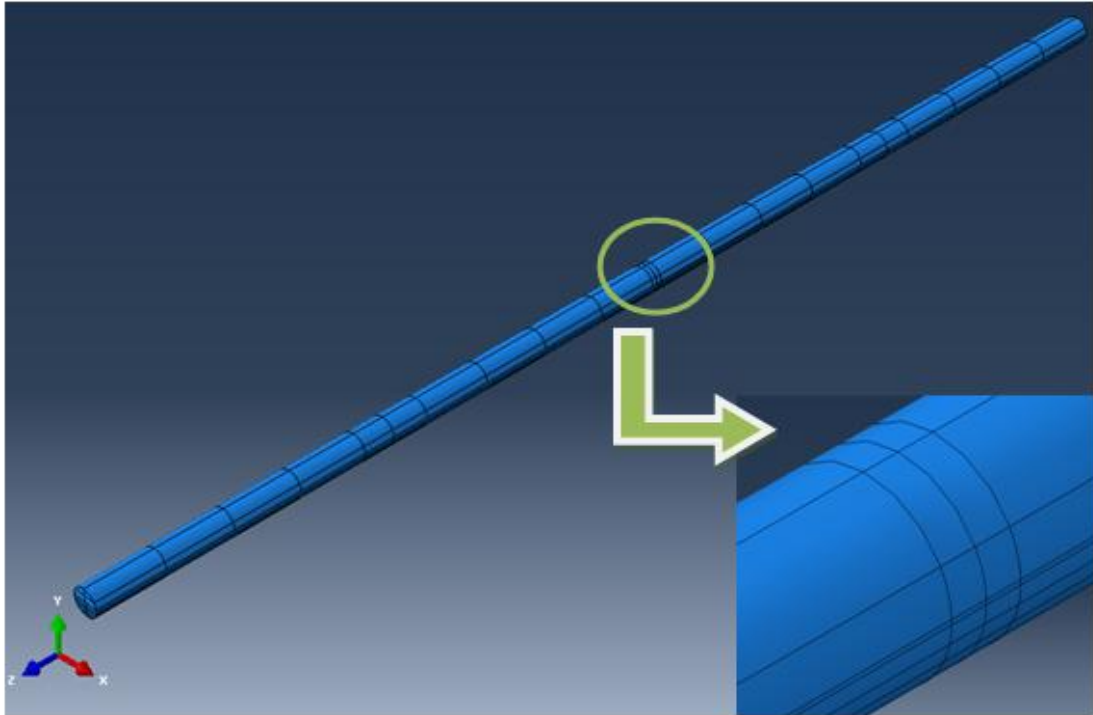


Figura 4. 4.- Detalle de la partición en la sección de la fisura.

4.2. Módulo “PROPERTY”

En este apartado se definen las propiedades del material de la parte creada en el módulo anterior. Como se ha explicado anteriormente, el material elegido es aluminio de módulo de elasticidad $E=72$ GPa, densidad $\rho=2800$ kg/m³ y coeficiente de Poisson $\nu=0.33$.

4.3. Módulo “ASSEMBLY”

En este módulo se introduce la mitad del eje creada, se copia y se ensamblan las dos mitades de forma que constituyan el eje final. A la hora de ensamblar estas dos mitades se selecciona

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

la opción de “Instance Type Independent”, que permite mallar cada mitad del eje de forma independiente.

4.4. Módulo “STEP”

Los casos estudiados en el presente proyecto, se analizan en un entorno estático. Por ello, en esta sección se crea una etapa (Step-1) de tipo estático, general. Además, debido a que se quiere analizar el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en la zona de la fisura, es necesario crear un “History Output” por cada “Crack” creado en el módulo interaction.

4.5. Módulo “INTERACTION”

En este módulo se impone el tipo de unión entre las dos mitades. En primer lugar, se crea una restricción de tipo “TIE”, en la zona superior de la sección (zona no fisurada). Esto permitirá que queden perfectamente unidas las dos mitades.

En segundo lugar, se crea una interacción de tipo “surface to surface” en la zona inferior de la sección (zona fisurada). Con esto se consigue, que una de las superficies no penetre en la otra cuando la fisura se encuentre en estado cerrado.

Como se puede observar en la figura 4.5, tanto la restricción (representada en fondo azul con puntos amarillos), como la interacción entre las superficies (representada con fondo rojo), dependerán de la profundidad de la fisura. En la figura se representan los casos correspondientes a una profundidad de fisura de $\alpha=0.5$ (izquierda) y $\alpha=0.1$ (derecha).

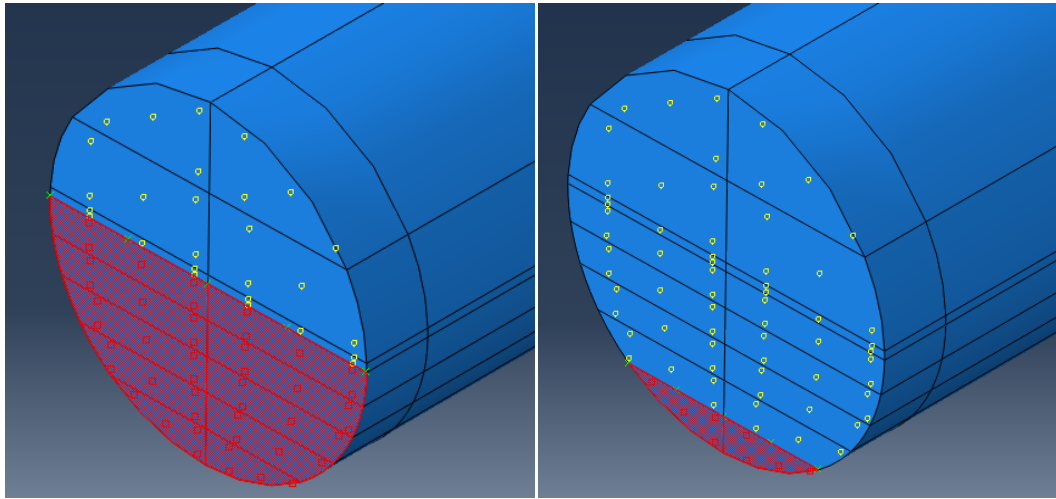


Figura 4. 5.- Restricción e interacción para $\alpha=0.5$ (izquierda) y $\alpha=0.1$ (derecha).

Además, se crea un “Crack” que defina el frente de fisura, como se muestra en la figura 4.6. Este “Crack” se debe definir en las dos mitades del eje y según sea la profundidad de fisura se colocará en una partición u otra.

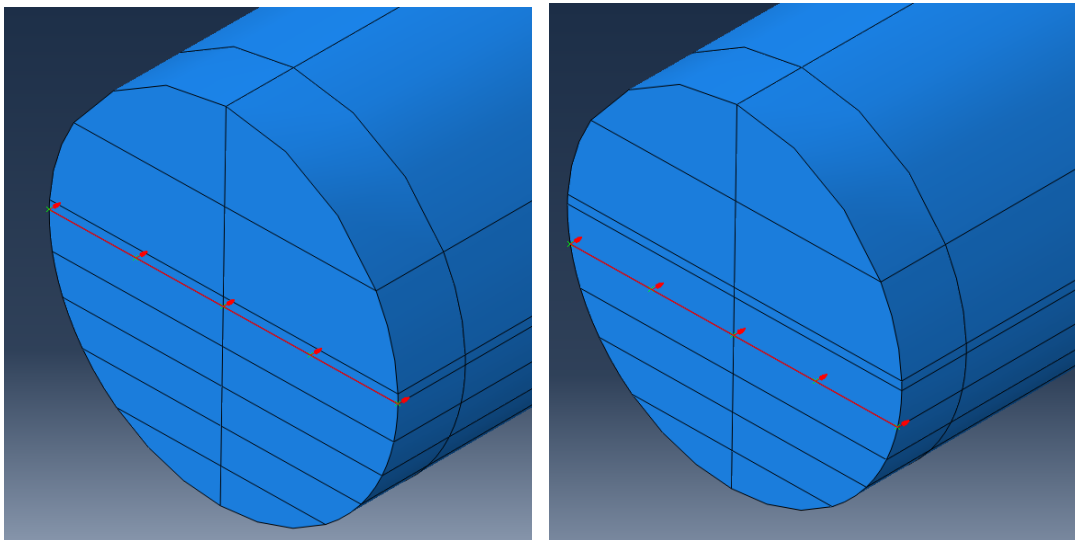


Figura 4. 6.- Crack que define el frente de fisura para una profundidad de fisura de $\alpha=0.5$ (izquierda) y $\alpha=0.4$ (derecha).

4.6. Módulo “LOAD”

En este apartado se definen las cargas y los apoyos. Se aplican dos cargas de 100 N situadas a 223 mm de los extremos del eje. En cuanto a los apoyos, se restringen los grados de libertad correspondientes a los desplazamientos X e Y, como se puede ver en la figura 4.7. Los giros no quedan restringidos.

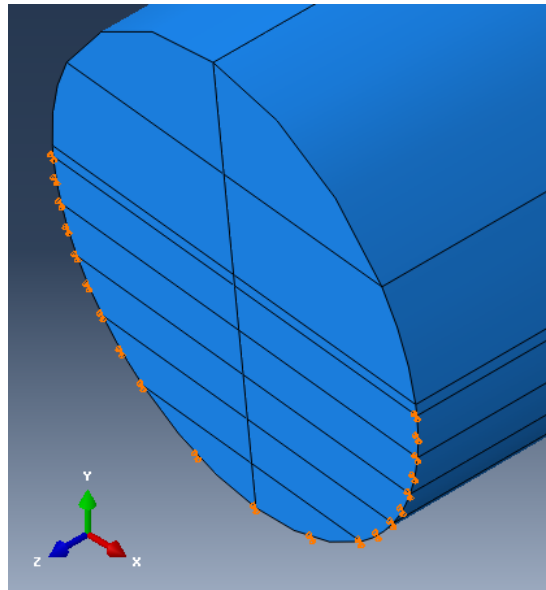


Figura 4. 7.- Apoyo en un extremo del eje.

4.7. Módulo “MESH”

Por último, se procede a mallar el modelo. Como se ha comentado anteriormente, el mallado variará según el caso a estudiar, tanto longitudinalmente como en la sección del eje. En este módulo se intenta buscar un compromiso entre el mallado y el tiempo de cálculo, es decir, que se obtengan buenos resultados reduciendo el tiempo de cálculo lo máximo posible.

Los elementos utilizados para el mallado son de tipo hexaédrico y se realiza un mallado de tipo estructurado.

Las distintas configuraciones del mallado de cada caso analizado se explicarán con más detalle en el quinto capítulo.

5. PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se parte de un modelo y un mallado de un estudio anterior [2], cuyos resultados se consideran válidos, ya que se asemejan a los obtenidos por otros autores [9]. Considerando este mallado, el tiempo computacional en un caso estático es aproximadamente una hora. Si se realizara un análisis dinámico el tiempo de cálculo se vería incrementado en gran medida, por lo que se intenta optimizar el mallado variando el número de elementos longitudinalmente y en la sección del eje.

En el presente trabajo se muestran 5 casos de todos los realizados, por ser los más representativos. En cada uno de ellos se muestran las particiones y el mallado elegido en la zona de la sección y a lo largo de toda la longitud del eje.

Para conseguir una reducción grande de tiempo, es necesario estudiar el tipo de mallado que se quiere imponer en cada modelo, puesto que al tener menos elementos, el programa ABAQUS tardará menos tiempo en llevar a cabo los cálculos. Sin embargo, al reducir el número de elementos en el mallado, se corre el riesgo de obtener resultados menos precisos. Por eso es necesario llegar a un equilibrio.

Cabe destacar que los 5 casos que aparecen a continuación son analizados en primer lugar para una profundidad de fisura de $\alpha=0.5$. Una vez estudiados y comparados los resultados de estos 5 casos, se elegirán aquellos que se consideren como válidos y se analizarán el resto de profundidades de fisura. Mostrándose los resultados y conclusiones más adelante.

Para llevar a cabo el tipo de mallado deseado, es necesario crear una serie de particiones en la sección y longitud del eje. De este modo será más sencillo distribuir el número de elementos del mallado.

En todos los casos, en la mitad superior de la sección, el mallado es más grueso, puesto que los resultados en esta zona son de poco interés, ya que se trata de la zona sin fisura. Esto se puede ver en la figura 5.1.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

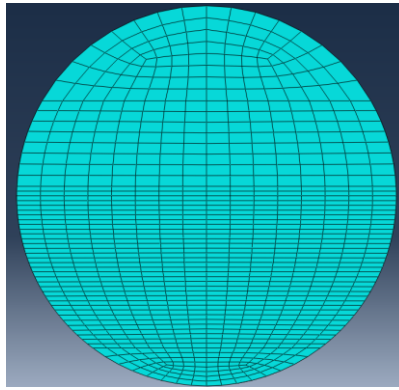


Figura 5. 1.- Ejemplo mallado de la sección.

Es importante destacar que en la zona próxima a la sección donde se encuentra la fisura, el mallado longitudinal debe ser más fino para mantener unos buenos resultados y esto por tanto, se repetirá en todos los casos.

En todos los casos, se mantendrán el mismo tipo de particiones a lo largo de la longitud del eje. En la figura 5.2, se muestra por un lado la imagen de dichas particiones, y por otro, un esquema en el que se acotan sus dimensiones en mm. Tanto en la imagen como en el esquema se muestran las particiones en la mitad del eje completo, ya que estas son simétricas.

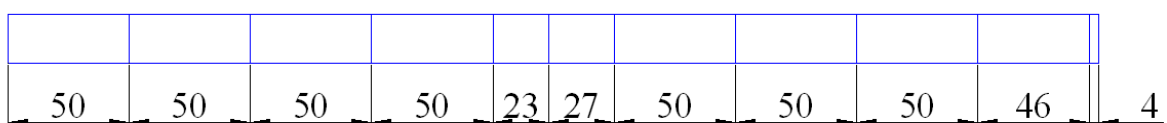
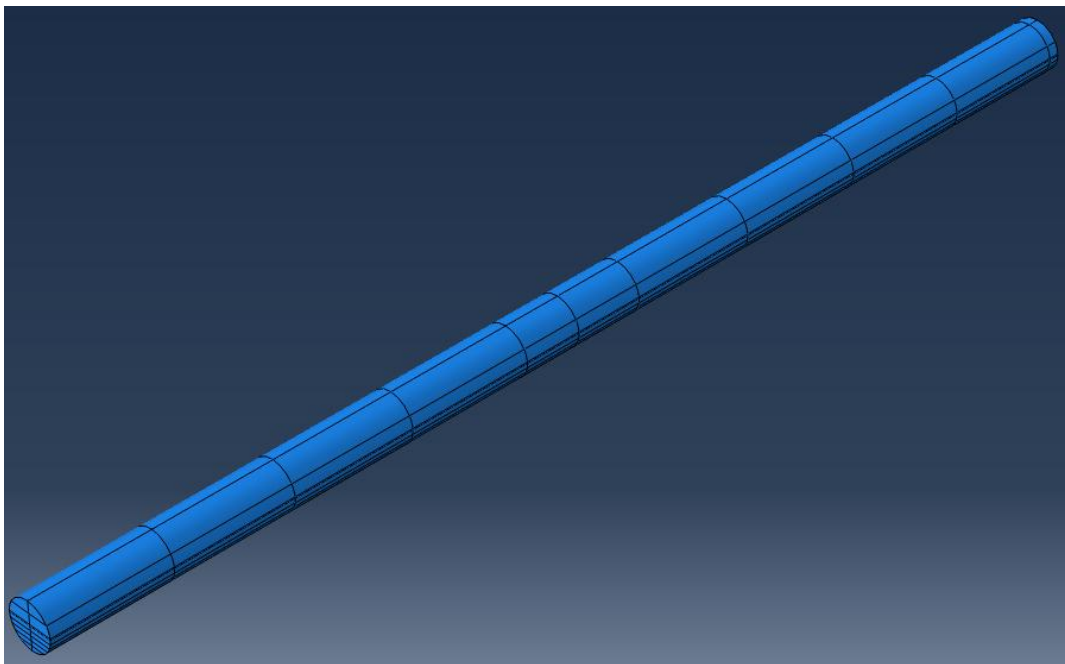


Figura 5. 2.- Particiones en la zona longitudinal de la mitad del eje. Caso (1, 2, 3, 4 y 5).

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Como se puede apreciar en la figura se llevan a cabo 9 particiones de 50 mm. Además, se realizan dos particiones, una en la zona donde se aplicará la carga (a 223 mm de distancia de los apoyos), y otra a 4 mm de distancia del centro del eje. Esta última partición se lleva a cabo para poder configurar un mallado más fino en esa zona del eje, zona donde se encuentra la fisura. De esta manera se podrán obtener resultados más precisos.

A continuación, se verán las distintas configuraciones de las particiones en la zona de la sección y el mallado de los cinco casos propuestos:

5.1. Casos propuestos

5.1.1. Caso 1

En este primer caso, la distribución de las particiones en la zona de la sección queda como se muestra en la figura 5.3. A la izquierda, se muestra una imagen de su distribución, y a la derecha, un esquema acotado que indica sus dimensiones en mm.

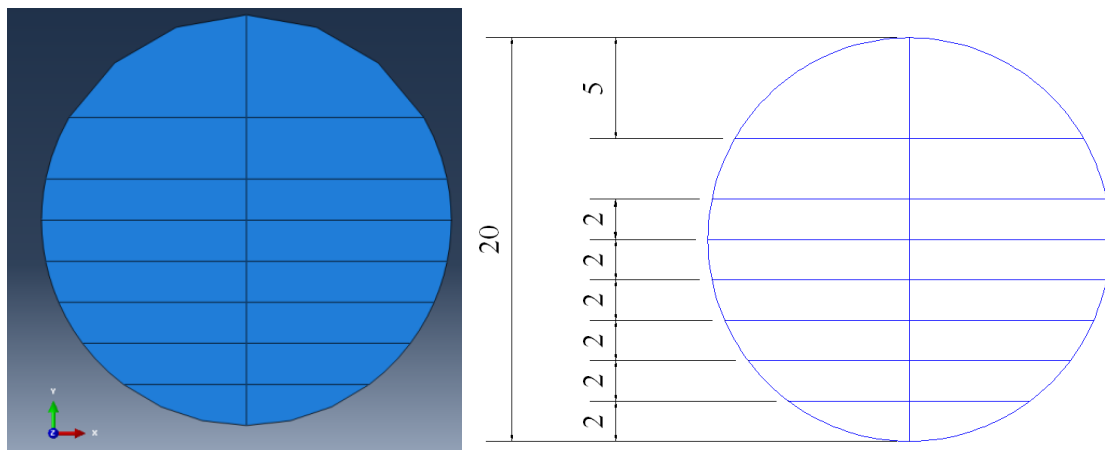


Figura 5. 3.- Particiones en la zona de la sección del eje (Caso1, 2, 3 y 4).

Se realiza una partición por cada profundidad de fisura: $\alpha=0.5$ (en el centro del eje), $\alpha=0.4$ (a 2 mm de distancia al centro del eje), $\alpha=0.3$ (a 4 mm de distancia al centro del eje), $\alpha=0.2$ (a 6 mm de distancia al centro del eje) y $\alpha=0.1$ (a 8 mm de distancia al eje).

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

También se añaden dos particiones en la zona superior de la sección, para así poder configurar un mallado más grueso. Una a 2 mm de distancia al centro del eje, y otra a 5 mm de distancia del centro del eje.

Además, se hace una partición perpendicular al frente de fisura, que recorre toda la sección del eje, y pasa por su punto medio.

En cuanto al mallado de la sección, se variará el número de elementos con respecto al trabajo de referencia [2], pero la distribución de ellos será similar. De este modo, se tendrá un mallado más fino en la zona de fisura, y más grueso en el resto de la sección. Como se comentó anteriormente, la zona más gruesa siempre estará en la parte superior de la sección, por encima de la fisura. En la figura 5.4, se puede ver por un lado una imagen de cómo quedaría el mallado en la sección, y por otro, el número de elementos en los que se divide cada partición.

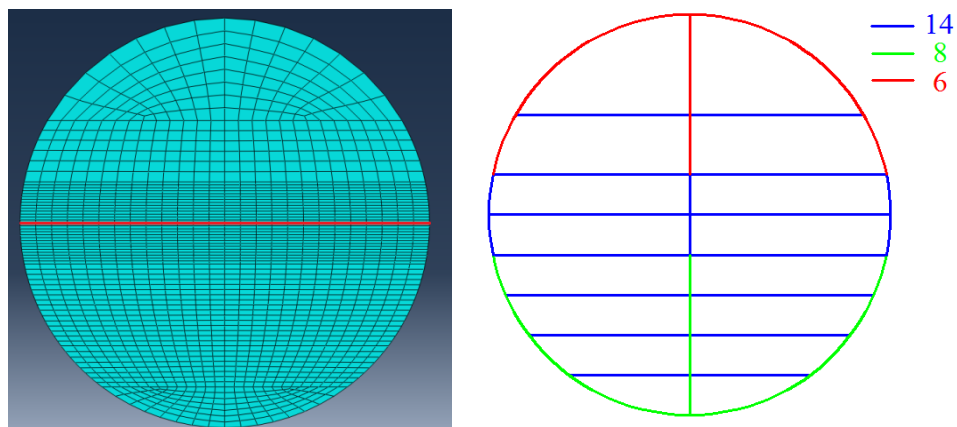
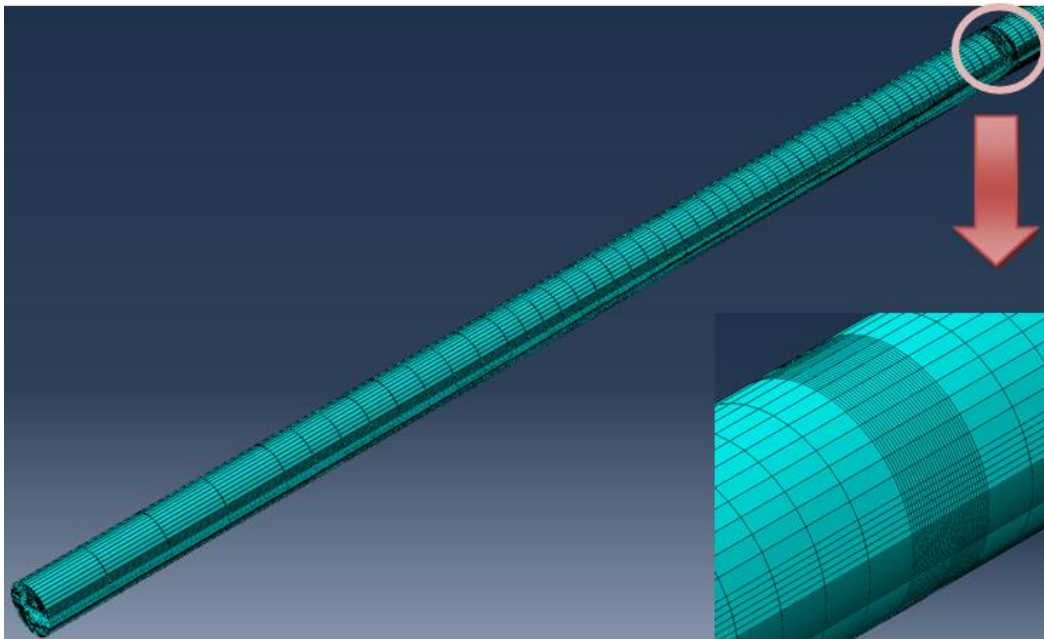


Figura 5. 4.- Mallado zona de la sección. Caso 1.

Con respecto al mallado longitudinal, en este primer caso se optó por ir aumentando el número de elementos desde los extremos del eje, hasta la partición más próxima a la zona de la fisura (zona que estará longitudinalmente más refinada). En la figura 5.5, se puede ver como quedaría el mallado longitudinal para este primer caso, así como un esquema en el que se indican el número de elementos que se divide cada partición para realizar el mallado.



2	2	4	4	3	3	6	8	8	10	14
50	50	50	50	23	27	50	50	50	46	4

Figura 5. 5.- Mallado zona longitudinal. Caso 1.

Comparando con el mallado del trabajo de referencia [2], el cual se muestra en la figura 5.6, se consigue reducir en gran medida el número de elementos.

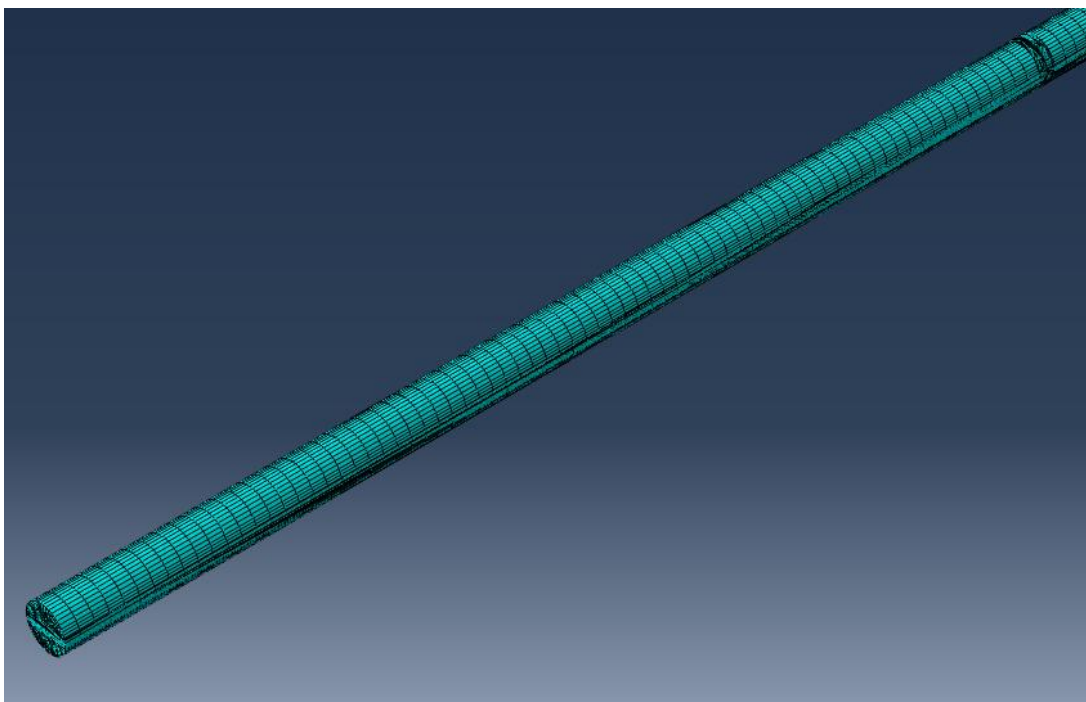


Figura 5. 6.- Mallado zona longitudinal. Trabajo de Referencia [2].

5.1.2. Caso 2

En este segundo caso, las particiones en la zona de la sección son las mismas que en el caso 1. (Figura 5.3).

Como se puede ver en la figura 5.7, se lleva a cabo un mallado con menor número de elementos que en el primer caso, pero siguiendo la misma configuración. Como se ha comentado anteriormente, la zona de la fisura ($\alpha=0.5$) tendrá un mallado más fino, y el resto un mallado más grueso.

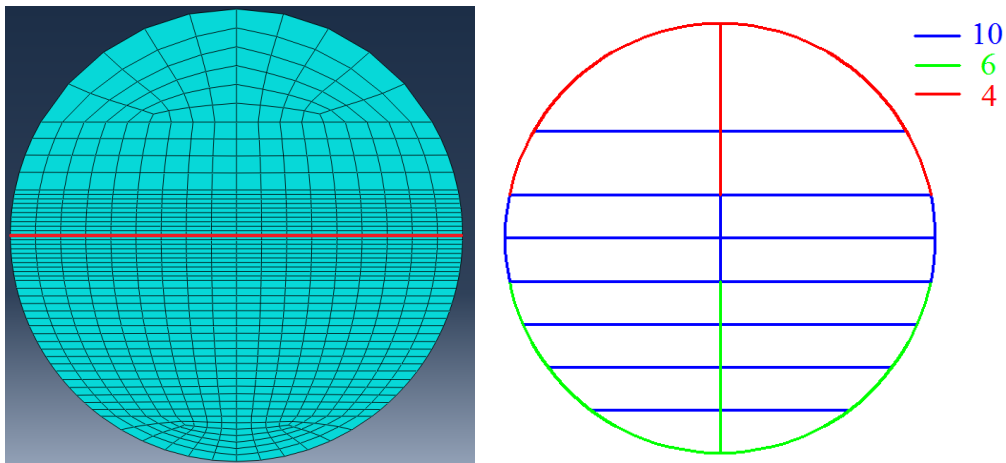
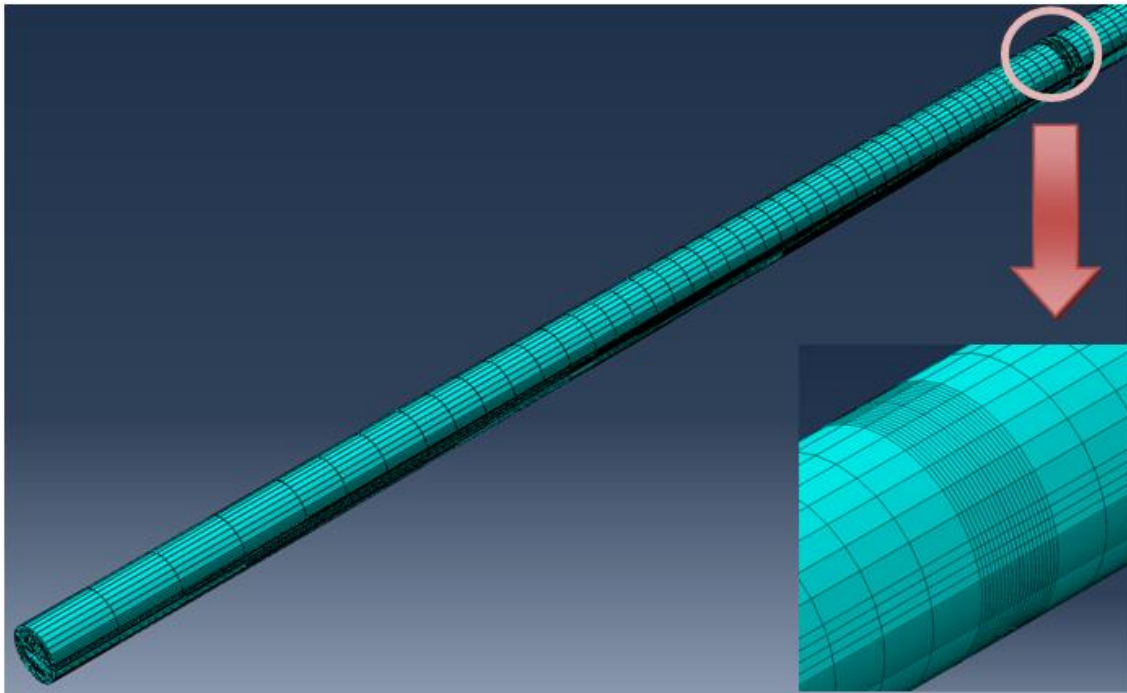


Figura 5. 7.- Mallado zona de la sección. Caso 2.

En cuanto al mallado a lo largo de la longitud del eje, como en el caso anterior, se va refinando desde los extremos del eje hasta la zona de la fisura, pero con un número de elementos distintos, como se puede observar en la figura 5.8. La parte más cercana a la fisura, y por lo tanto la de mayor importancia en cuanto a resultados se refiere, pasa de tener 14 elementos, en el caso 1, a 10 elementos, en el caso 2.



2	2	3	4	2	3	6	7	8	9	10
50	50	50	50	23	27	50	50	50	46	4

Figura 5. 8.- Mallado zona longitudinal. Caso 2.

5.1.3. Caso 3

En este tercer caso, se realizan las mismas particiones que en los dos casos anteriores. Ver figura 5.3.

Con respecto al mallado de la sección, se intenta reducir aún más el número de elementos comparado con los casos anteriores. En la figura 5.9, se puede observar que el mallado de la sección es más homogéneo que el de los casos anteriores, ya que hay poca diferencia entre el mallado de la zona de la fisura ($\alpha=0.5$), y la zona inferior de la sección del eje.

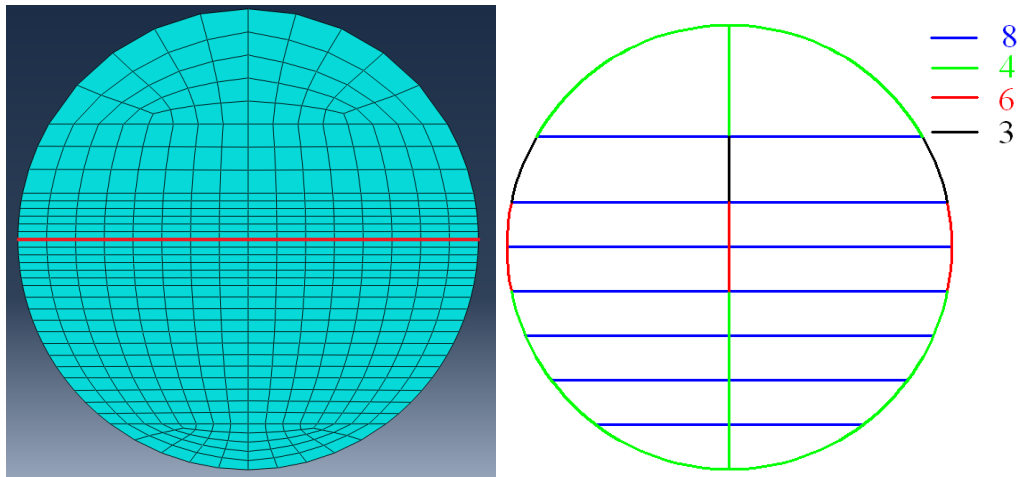


Figura 5. 9.- Mallado zona de la sección. Caso 3.

En este tercer caso se usará el mismo tipo de mallado longitudinal que en el caso 2, puesto que se quiere analizar que ocurre al reducir únicamente el número de elementos en la sección. Ver figura 5.8.

5.1.4. Caso 4

En este cuarto caso la distribución de las particiones a lo largo de la sección varía con respecto a los casos anteriores. El único cambio tiene lugar en la partición situada en la zona superior. En vez de situarse a 2 mm del centro del eje, en este caso estará a una distancia de 0,5 mm. Con este cambio se pretende intentar reducir el número de elementos en la parte superior del eje, puesto que es en esa zona donde los resultados tendrán menor importancia. Ver figura 5.10.

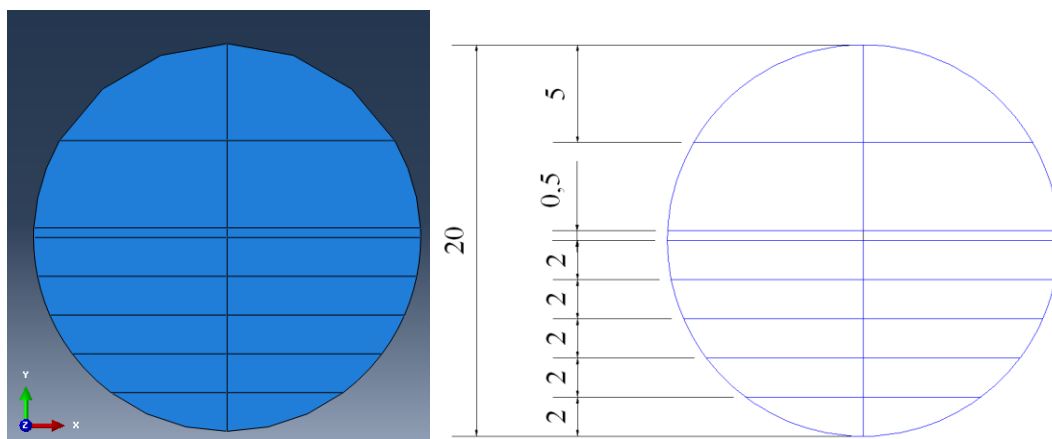


Figura 5. 10.- Particiones en la zona de la sección. Caso 4.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

En cuanto al mallado en la sección del eje, en este caso se reduce el número de elementos en la mitad superior, debido a la localización de la nueva partición. Además, en este caso no existe diferencia de mallado entre la zona de la fisura y el resto de la mitad inferior de la sección, es decir, se prueba con un mallado totalmente homogéneo para la mitad inferior. Como en los casos anteriores, en la figura 5.11, se observa por un lado, una imagen del mallado y por otra un esquema con el número de elementos en los que se divide cada partición.

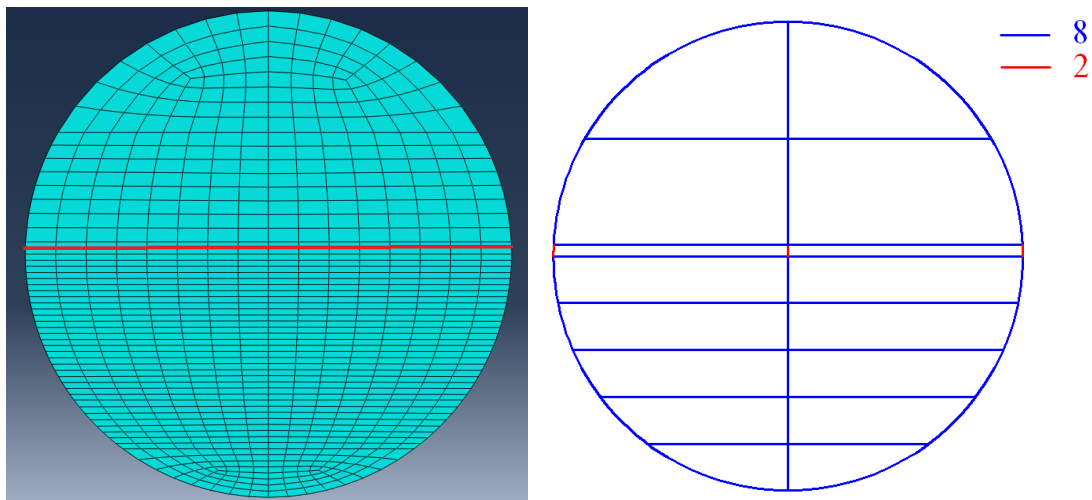


Figura 5. 11.- Mallado zona de la sección. Caso 4.

El mallado longitudinal se mantendrá igual que en los dos casos anteriores. Ver figura 5.8.

5.1.5. Caso 5

En este último caso, se vuelve a usar el modelo de particiones en la sección del caso 1,2 y 3. Ver figura 5.3.

En este caso, se vuelve a usar un mallado más fino en la zona de la fisura, y más grueso en el resto de la sección del eje, como se puede observar en la figura 5.12.

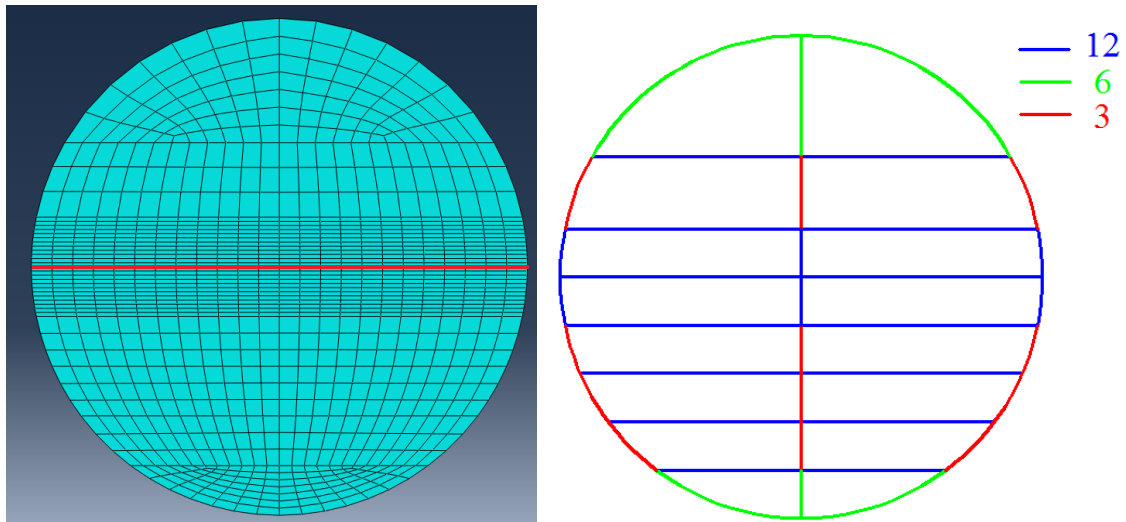
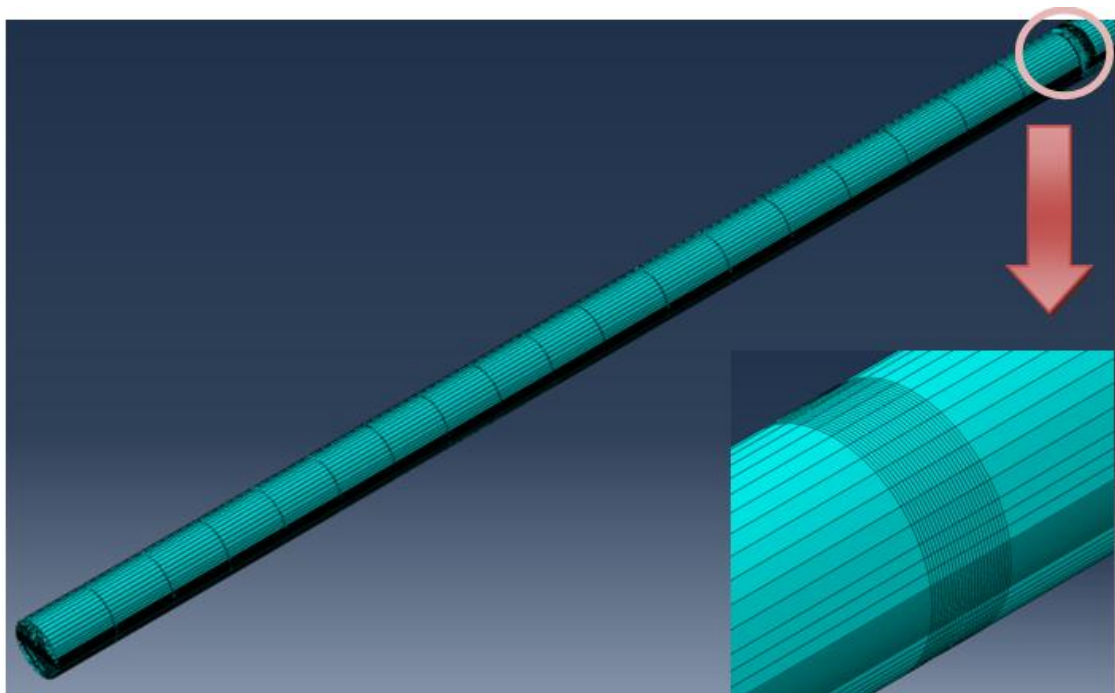


Figura 5. 12.- Mallado zona de la sección. Caso 5.

En este caso, el mallado de la zona longitudinal varía con respecto a todos los casos anteriores. Se prueba con un mallado uniforme en el que cada partición está dividida en 2 elementos, excepto la partición más cercana a la fisura, que tendrá 12 elementos. Ver figura 5.13.



2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	12
50	50	50	50	23	27	50	50	50	46	4

Figura 5. 13.- Mallado en la zona longitudinal. Caso5.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

5.1.6. Resumen del mallado en cada uno de los casos

A continuación, se muestra un resumen de los tipos de mallado que se han realizado en cada caso.

En la tabla 5.1, se muestra el tamaño de cada partición longitudinal, así como el número de elementos en los que está dividida. El número de particiones que aparece en la tabla se corresponde con la mitad del eje.

Tabla 5. 1.- Resumen del mallado longitudinal.

PARTICIONES	LONGITUD DE PARTICIÓN (mm)	NÚMERO DE ELEMENTOS CASO 1	NÚMERO DE ELEMENTOS CASO 2	NÚMERO DE ELEMENTOS CASO 3	NÚMERO DE ELEMENTOS CASO 4	NÚMERO DE ELEMENTOS CASO 5
1	50	2	2	2	2	2
2	50	2	2	2	2	2
3	50	4	3	3	3	2
4	50	4	4	4	4	2
5	23	3	2	2	2	2
6	27	3	3	3	3	2
7	50	6	6	6	6	2
8	50	8	7	7	7	2
9	50	8	8	8	8	2
10	46	10	9	9	9	2
11	4	14	10	10	10	12

En la figura 5.14, se pueden ver resumidos los mallados de la sección para cada uno de los casos estudiados en este proyecto.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

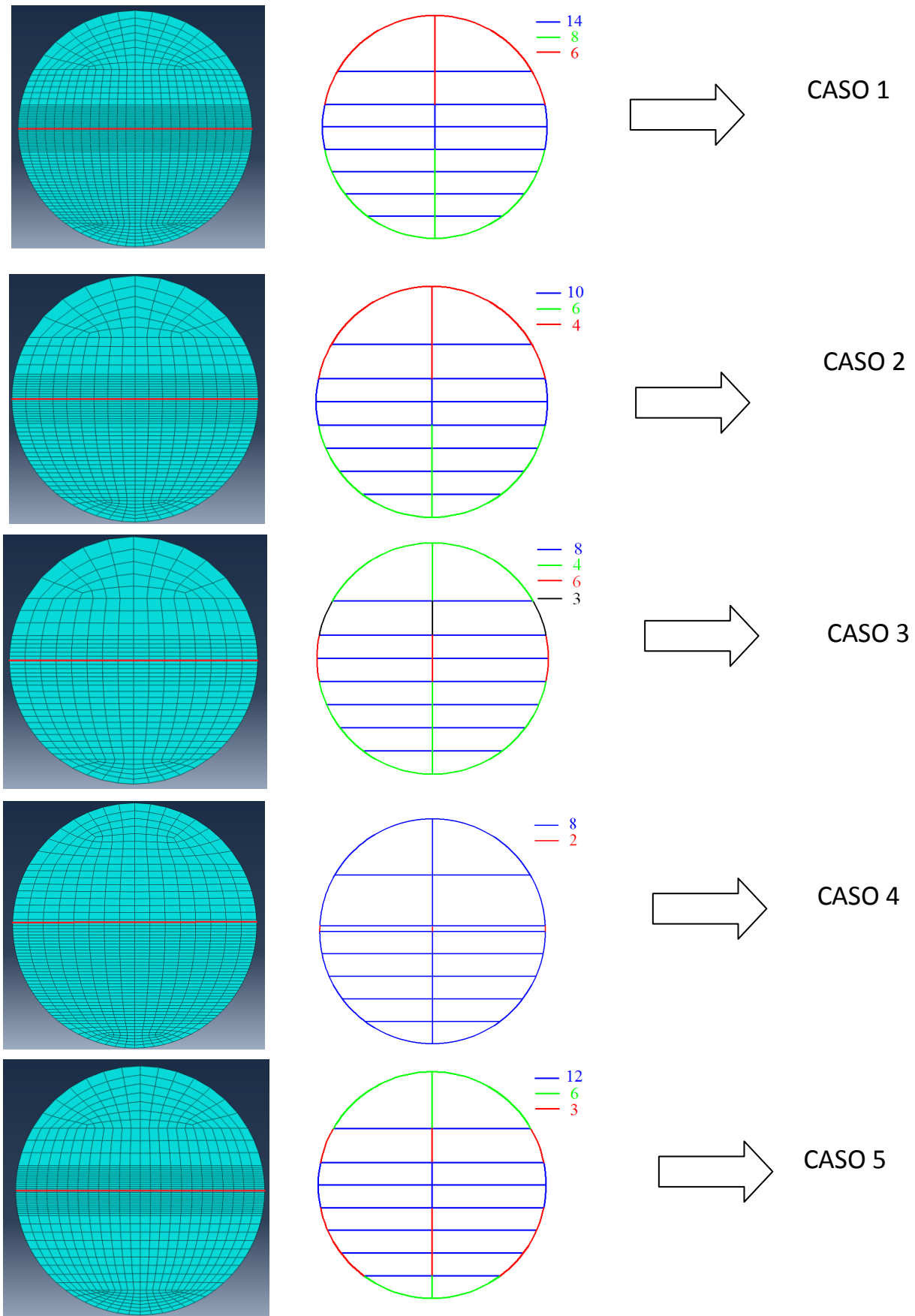


Figura 5. 14.- Resumen mallado en la sección.

5.2. Comparación de casos

Como se puede observar en la tabla 5.2, los casos 1 y 2 requieren un mayor tiempo de cálculo que los demás casos. Por este motivo, estos dos primeros casos no se considerarán como buenos.

Tabla 5. 2.- Comparación del número de elementos y tiempo de cálculo en los 5 casos analizados.

CASOS	Nº DE ELEMENTOS	TIEMPO DE CÁLCULO
CASO 1	110592	60 min
CASO 2	48832	25 min
CASO 3	29568	6 min
CASO 4	48384	8 min
CASO 5	31680	15 min

En la tabla 5.3, se muestra una comparación del desplazamiento medio, del punto superior e inferior de la sección del eje, en dirección Y, del caso 3, 4 y 5, con respecto a los del trabajo de referencia. Además se calcula el error cometido.

$$Error = \frac{|Desplazamiento_{referencia} - Desplazamiento_{caso\ n}|}{|Desplazamiento_{referencia}|} \quad (5.1)$$

Tabla 5. 3.- Comparación de los desplazamientos en el eje Y y error cometido con respecto al trabajo de referencia.

CASOS	DESPLAZAMIENTOS EJE Y (m)	TIEMPO DE CÁLCULO	ERROR (%)
CASO 3	-0.004188	6 min	0.25744
CASO 4	-0.004167	8 min	0.261748
CASO 5	-0.00417	15 min	0.073246
TRABAJO DE REFERENCIA	-0.004178	1 hora	-

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Como se puede observar, los errores en todos los casos son muy bajos, por lo que se considerarían los 3 modelos como válidos.

Sin embargo, tras numerosas pruebas de verificación, el mallado del caso 3 no permite obtener resultados del FIT correctos, dando resultados negativos del FIT para un tipo de fisura abierta. Estos resultados son incongruentes, y hacen considerar el caso 3, como un caso incorrecto.

Por tanto, finalmente se considerarán como válidos los casos 4 y 5, los cuales se estudiarán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

6. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) para distintas profundidades de fisura de los dos casos considerados como válidos, los casos 4 y 5. Además se realizará una comparación con los resultados del trabajo de referencia.

6.1. Cálculo del FIT a partir de la herramienta crack

Para calcular el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) a lo largo de todo el frente de la fisura, es necesario usar la herramienta “Crack” del programa ABAQUS, como ya se explicó en el capítulo de Modelo Numérico. Hay que recordar, que se crean dos “Crack”, uno en cada mitad del eje y estarán situados en la sección donde se encuentra la fisura. La posición del crack irá variando según la profundidad de fisura como se vio en la figura 4.6.

Esta herramienta proporciona valores del FIT en cada punto del frente de fisura. En ella hay que seleccionar el número de iteraciones necesarias hasta observar una convergencia de los resultados. En este proyecto se definen cinco iteraciones, ya que en el trabajo de referencia [2] se comprobó que era el número adecuado. Por ello, el valor correcto que se deberá tomar de cada FIT, es el quinto.

Hay que tener en cuenta que para esfuerzos de tracción en la fisura, es decir, cuando la fisura es de tipo abierta, los valores del FIT serán positivos. Sin embargo, cuando la fisura está sometida a esfuerzos de compresión, fisura cerrada, los FIT serán nulos. En muchos casos, para fisuras de tipo cerrada, los FIT son de valor negativo, pero muy cercanos a cero. Por ello siempre que sean fisuras sometidas a esfuerzos de compresión, los valores del FIT se considerarán nulos.

6.2. Cálculo del FIT para el caso 4

En primer lugar, se deben obtener todos los valores de los dos “Cracks” creados, uno por cada mitad del eje. En este caso, se obtendrán 85 valores por cada “Crack”. Teniendo en cuenta que el programa ABAQUS realiza cinco iteraciones, se tomarán valores de cinco en cinco, quedando

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

finalmente 17 valores por cada “Crack”. Estos 17 valores corresponden al FIT de cada uno de los puntos de todo el frente de fisura, como se muestra en la figura 6.1.

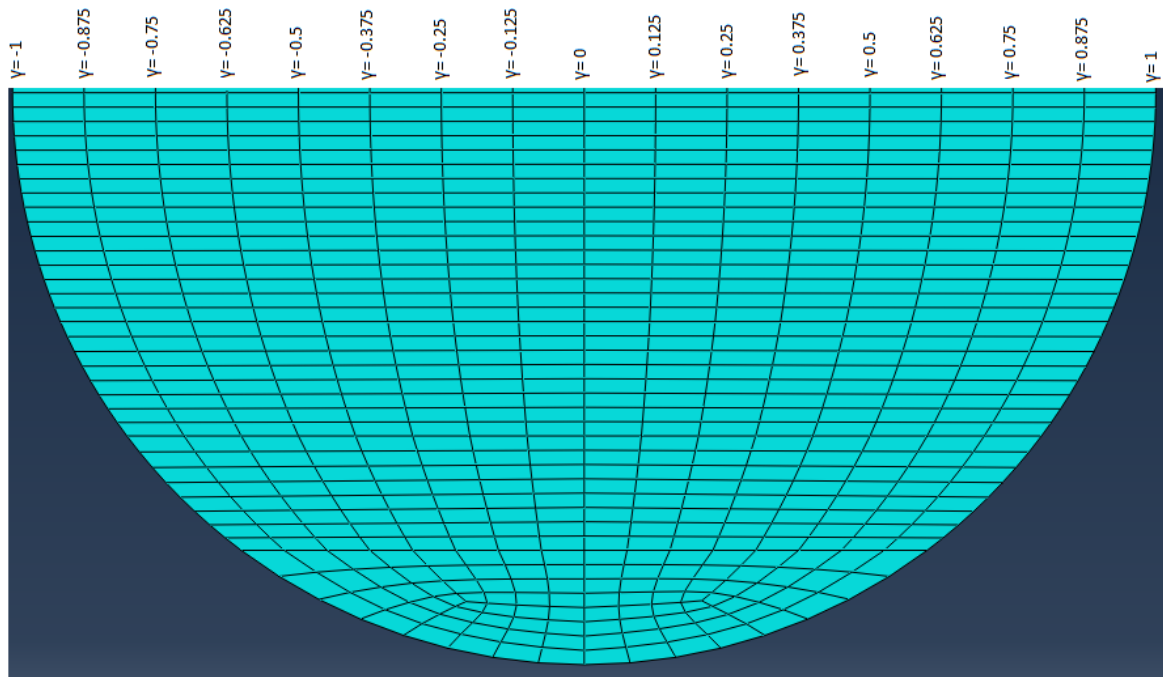


Figura 6. 1.- Esquema posición relativa del frente de fisura (caso 4).

Finalmente, sumando los FIT de cada parte del eje, se obtienen los valores que aparecen en la tabla 6.1.

Tabla 6. 1.- FIT de cada una de las profundidades de fisura para el caso 4.

Posición relativa en el frente de fisura (y)	Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) [$MPa \cdot m^{1/2}$]				
	$\alpha= 0.5$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.2$	$\alpha= 0.1$
0.875	1.005496	0.783401	0.664792	0.594303	0.561892
0.75	1.094923	0.886868	0.770825	0.718878	0.716379
0.625	1.131648	0.928256	0.814999	0.773929	0.794677
0.5	1.159358	0.960029	0.848733	0.815344	0.8504
0.375	1.175024	0.9781	0.868675	0.840777	0.886033
0.25	1.186588	0.991507	0.883220	0.858915	0.909246
0.125	1.192007	0.997797	0.890321	0.868108	0.921971
0	1.194145	1.000691	0.893476	0.872035	0.927561
-0.125	1.192007	0.997797	0.890321	0.868108	0.922025
-0.25	1.186586	0.991507	0.883220	0.858915	0.909339
-0.375	1.175024	0.978098	0.868675	0.840777	0.886024
-0.5	1.159358	0.960029	0.848733	0.815344	0.850389
-0.625	1.131650	0.928256	0.814999	0.773929	0.794741
-0.75	1.094927	0.886868	0.770825	0.718878	0.716306
-0.875	1.0055	0.783404	0.664792	0.594304	0.561819

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

En la figura 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 se representan el FIT de cada profundidad de fisura, frente a la posición relativa (γ), para todas las profundidades de fisura analizadas. Además, a la derecha de cada gráfica se muestra el mallado de la sección para cada profundidad de fisura. En este caso, como ya se comentó anteriormente, el mallado es homogéneo en la mitad inferior de la sección independientemente de la profundidad de fisura. No será así, en el caso 5.

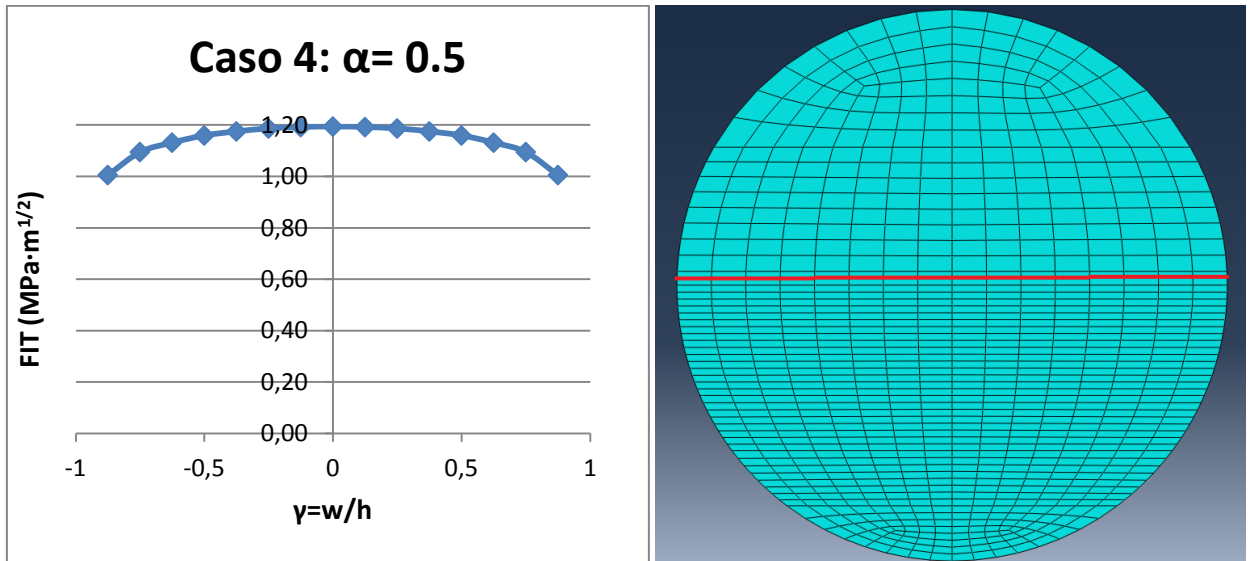


Figura 6. 2.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha=0.5$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

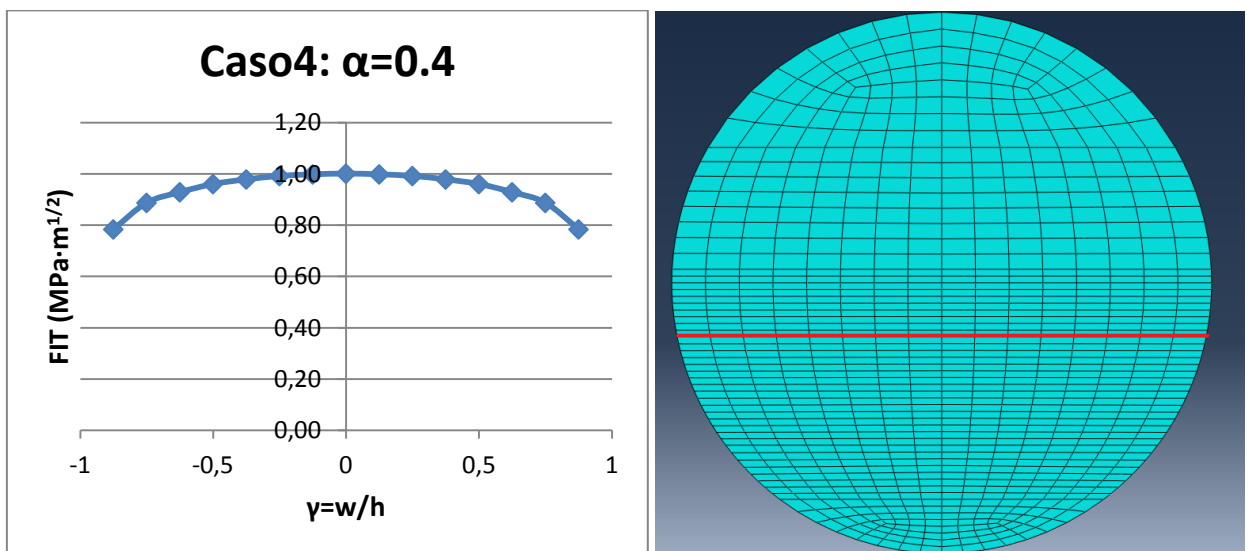


Figura 6. 3.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha=0.4$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

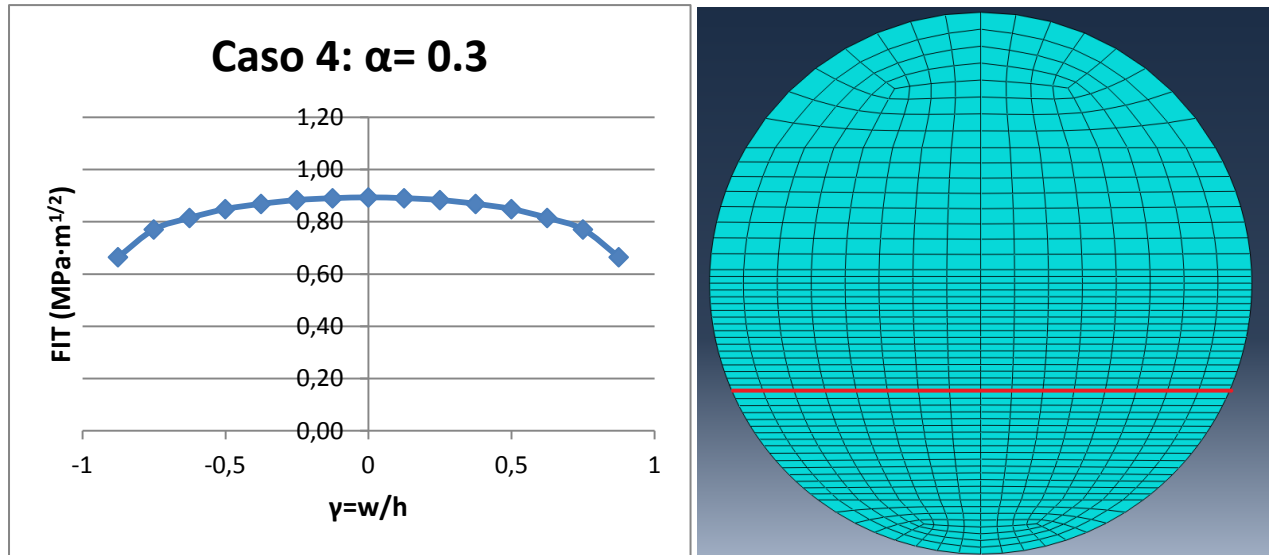


Figura 6. 4.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.3$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

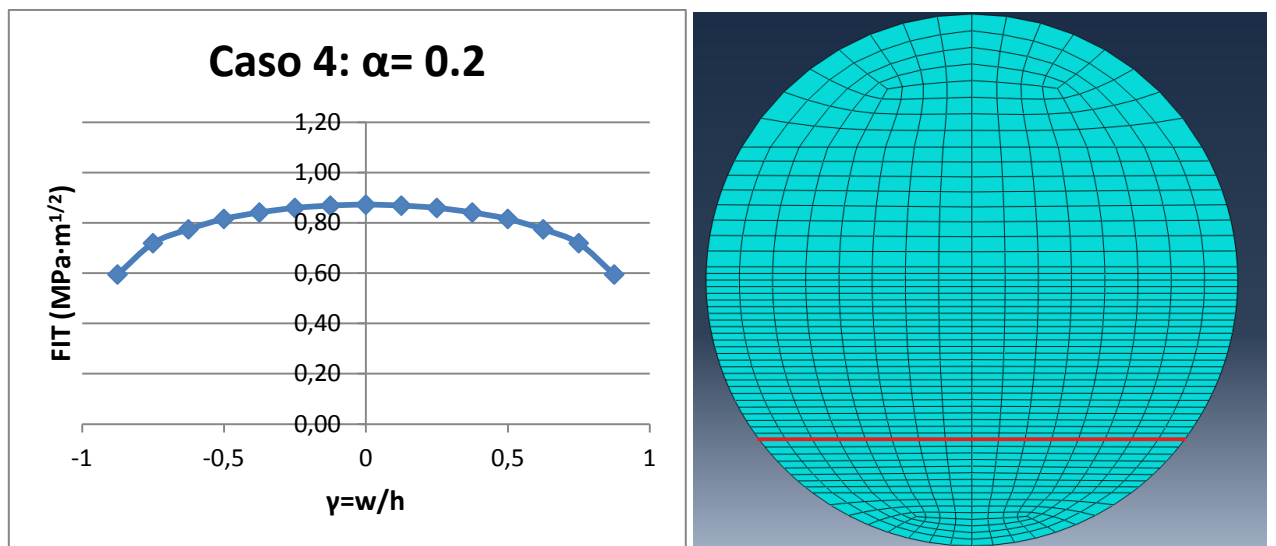


Figura 6. 5.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.2$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

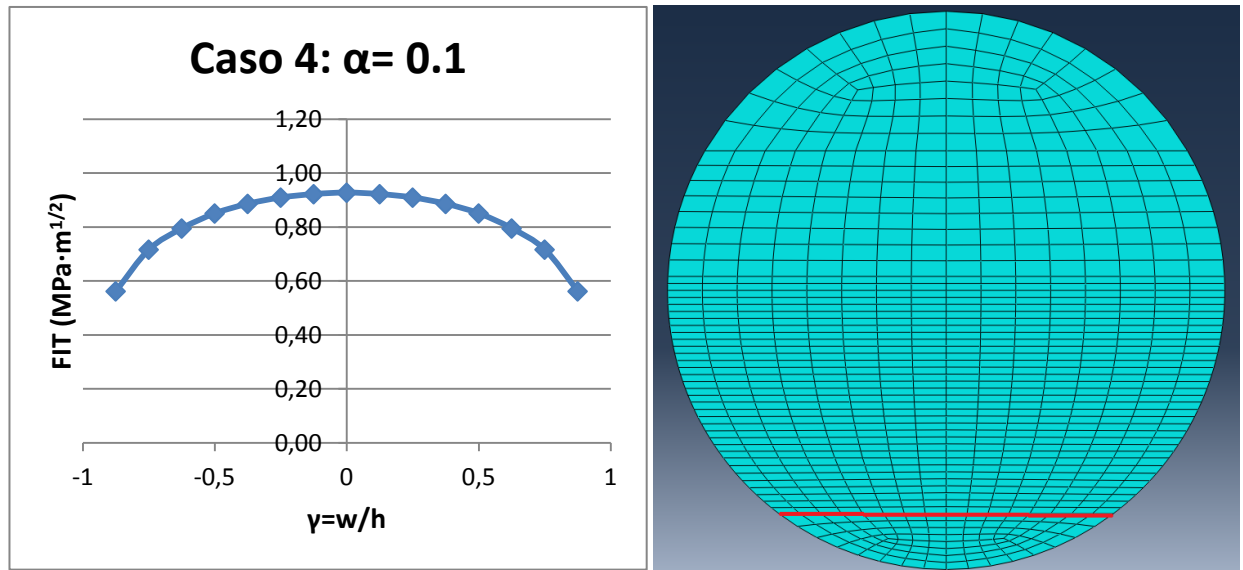


Figura 6. 6.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4: $\alpha = 0.1$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

Como se muestra en la tabla 6.1 y figura 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 los valores del FIT aumentan a medida que se acercan al punto medio de la sección del eje, es decir, para una posición relativa en el frente de fisura (γ) igual a cero.

Además, se puede observar como los FIT tienen una tendencia a disminuir a medida que la profundidad de fisura es menor. Sin embargo, para la profundidad de fisura $\alpha = 0.1$, este hecho no se cumple, ya que en muchos de sus puntos, el FIT tiene valores superiores a los de la profundidad de fisura $\alpha = 0.2$. Esto puede deberse a que el mallado en la zona cercana a $\alpha = 0.1$ está más distorsionado y los resultados obtenidos son menos precisos.

6.3. Cálculo del FIT para el caso 5

En este caso, se obtienen 125 valores por cada crack, puesto que el mallado de la sección es más fino. Para este caso se tomarán valores de diez en diez, quedando así 13 valores del FIT para todo el frente de fisura, al igual que en el trabajo de referencia [2], como se muestra en la tabla 6.2.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

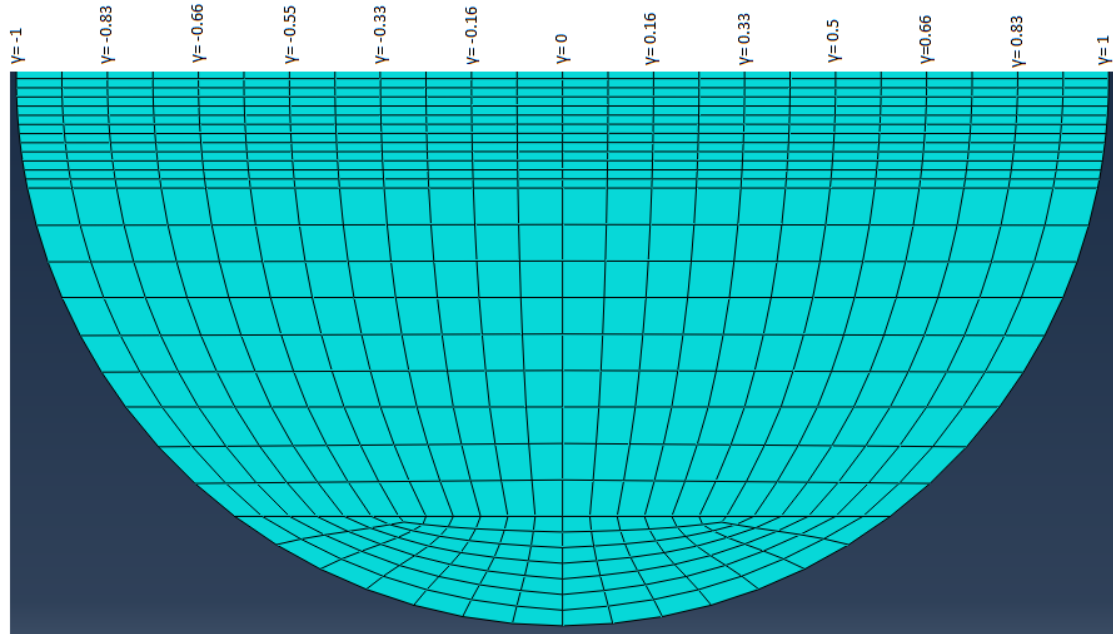


Figura 6. 7.- Esquema posición relativa del frente de fisura (caso 5).

Sumando los FIT de cada parte del eje, se obtienen los valores que aparecen en la tabla 6.2.

Tabla 6. 2.- FIT de cada una de las profundidades de fisura para el caso 5.

Posición relativa en el frente de fisura (y)	Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) [$MPa \cdot m^{1/2}$]				
	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.1$
0.83	1.058572	0.843847	0.723465	0.661452	0.642355
0.66	1.127110	0.915471	0.805231	0.760928	0.776141
0.5	1.162809	0.953358	0.849461	0.816035	0.850808
0.33	1.183113	0.975205	0.875299	0.848735	0.894966
0.16	1.193831	0.986855	0.889182	0.866411	0.919145
0	1.197146	0.99053	0.893625	0.872117	0.927445
-0.16	1.193821	0.986842	0.889172	0.866402	0.919003
-0.33	1.183097	0.975183	0.875283	0.848716	0.894974
-0.5	1.162805	0.953338	0.849446	0.816004	0.85081
-0.66	1.12713	0.915458	0.805215	0.760903	0.776124
-0.83	1.058616	0.843847	0.723455	0.661433	0.642262

En la figura 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 se representan el FIT de cada profundidad de fisura frente a la posición relativa (y), para la todas las profundidades de fisura analizadas. Además, como en el caso anterior, a la derecha de las gráficas se muestra una imagen del mallado de la sección en el que se puede ver como varía a medida que disminuye la profundidad de fisura.

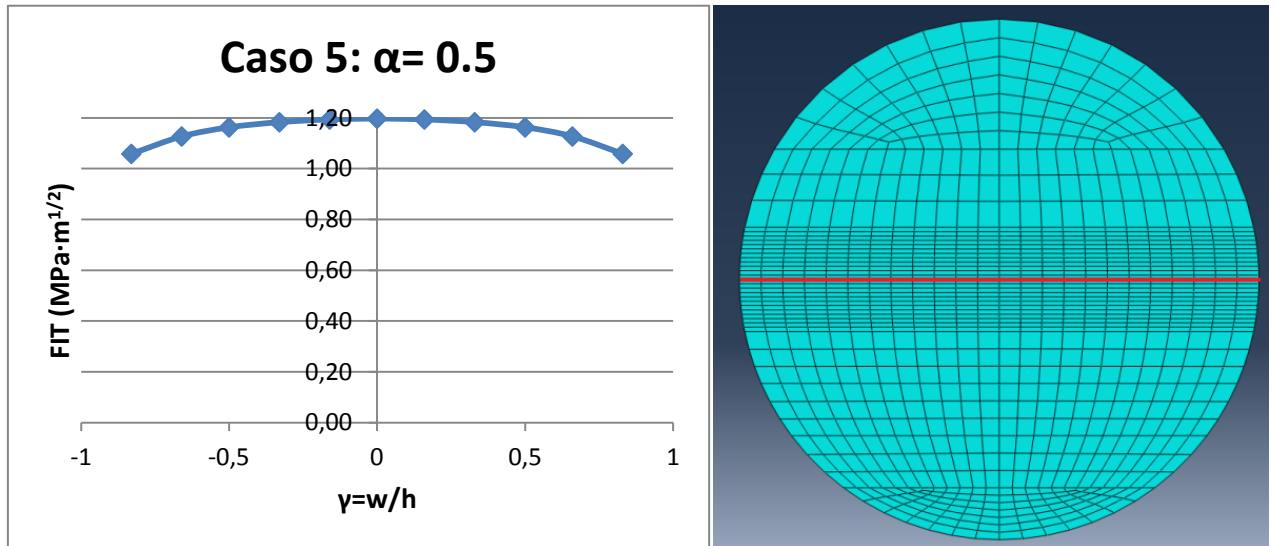


Figura 6. 8.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.5$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

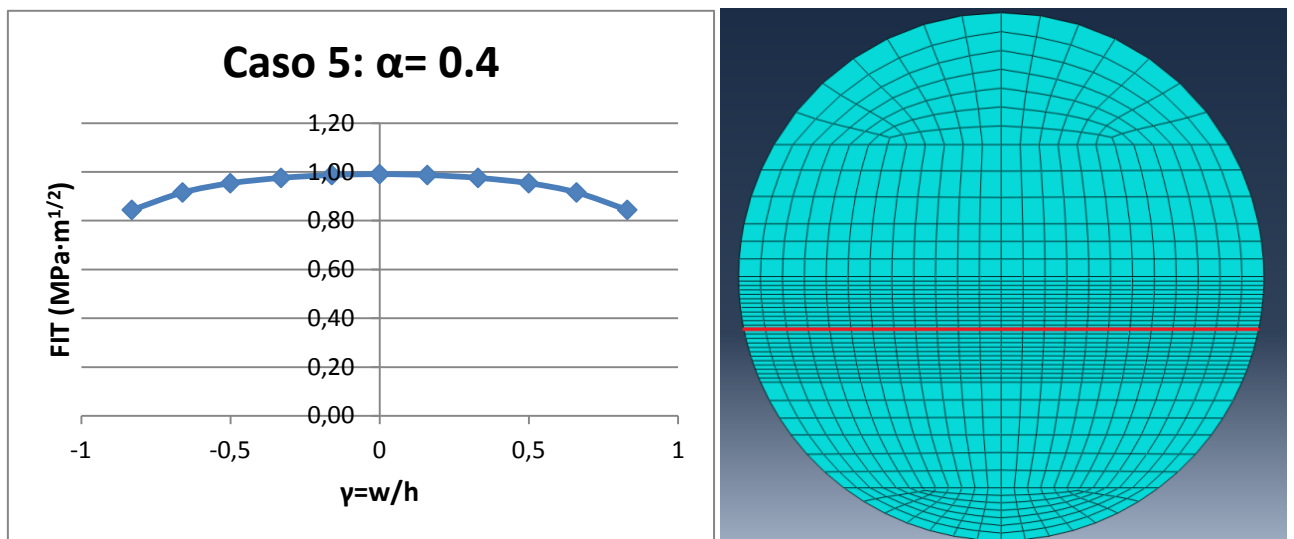


Figura 6. 9.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.4$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

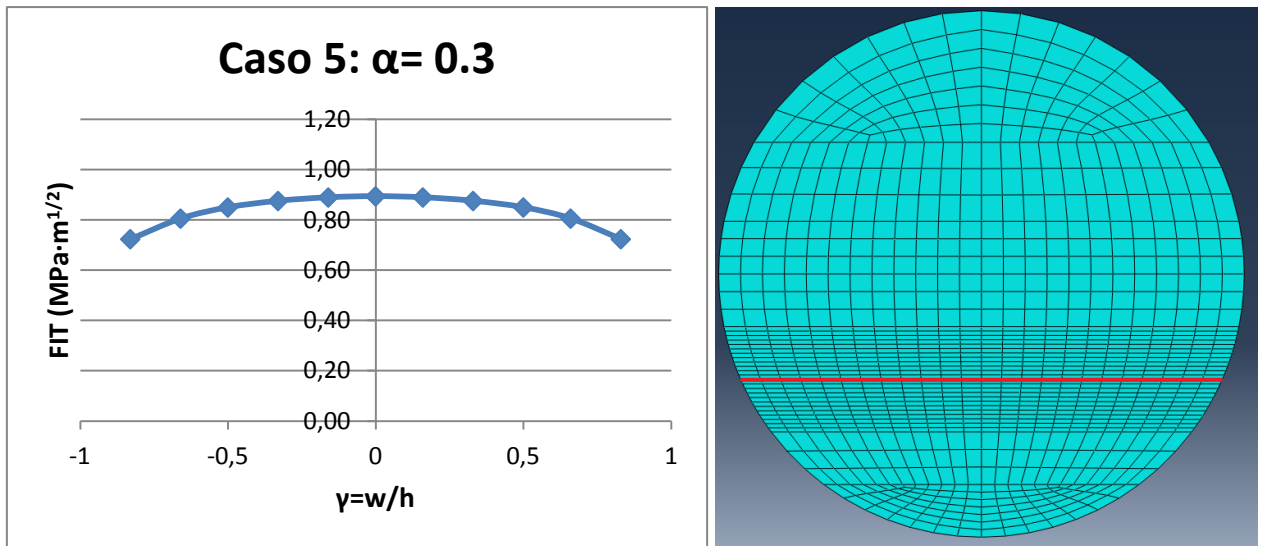


Figura 6. 10.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.3$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

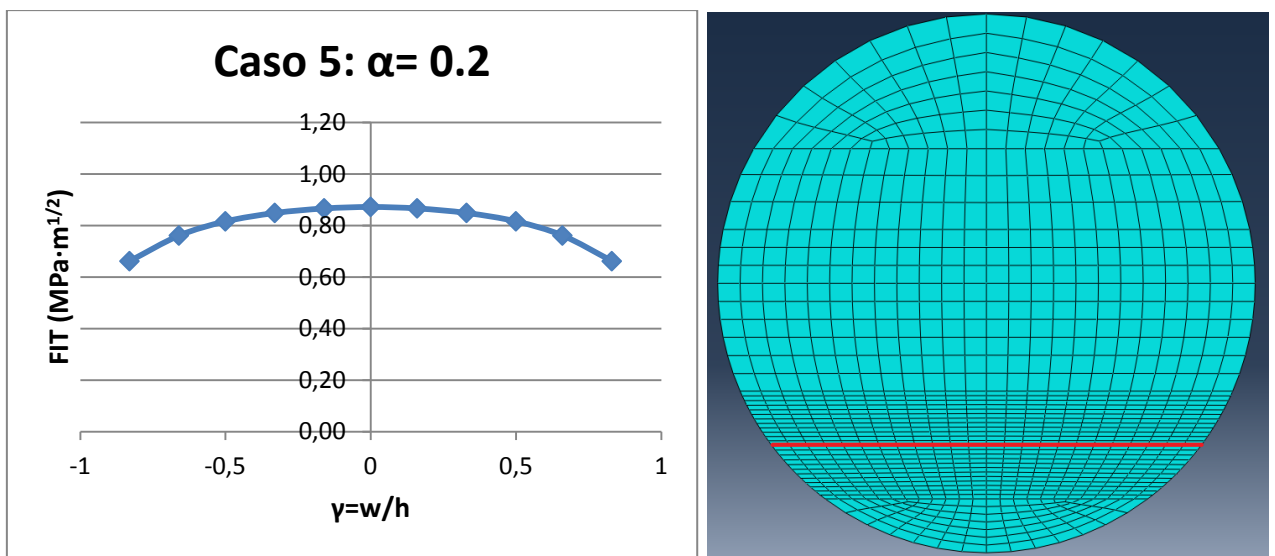


Figura 6. 11.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.3$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

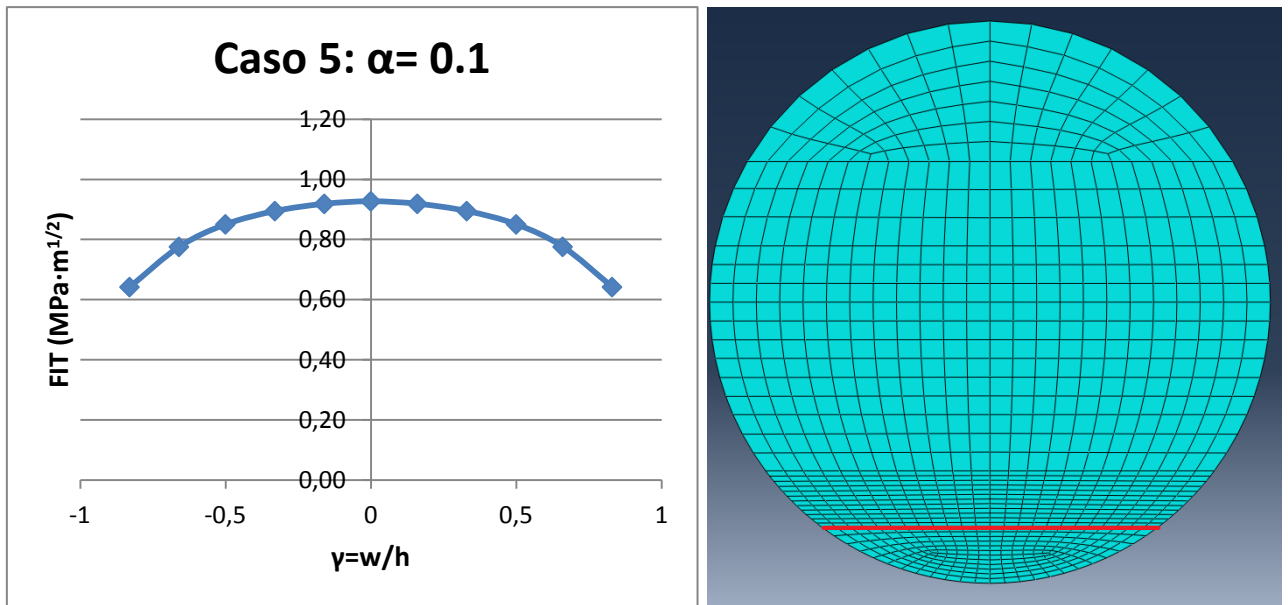


Figura 6. 12.- FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 5: $\alpha = 0.1$ (Izquierda).
Mallado en la sección (derecha).

En este caso 5, los resultados del FIT siguen una tendencia similar a la del caso anterior. Se observa el aumento de los valores del FIT a medida que se acerca a la posición relativa, $\gamma=0$. Punto donde el FIT será mayor.

En este caso, los valores del FIT también disminuyen con la profundidad de fisura, excepto en $\alpha=0.1$, donde al igual que antes, no cumple esta regla.

6.4. Comparación de resultados

A continuación, en las tablas 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 se muestra una comparación del FIT, del caso 4 y caso 5 con el caso de referencia. Hay que tener en cuenta, que para el caso 4, los valores del FIT pertenecen a una posición relativa en el frente de fisura (γ) distinta de la del caso de referencia. Esto se debe a que el mallado en la sección es diferente que en el caso 5 y por tanto, que en el caso de referencia [2]. Por ello, es necesario hacer una interpolación de los valores usando la ecuación 6.1:

$$y = y_a + (x - x_a) \cdot \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \quad (6.1)$$

Además, se muestra el error relativo de los casos 4 y 5 con respecto a los valores de referencia. Para el cálculo del error relativo, se usará la expresión:

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

$$Error = \frac{|Valor_{referencia} - Valor_{nuevo}|}{|Valor_{referencia}|} \quad (6.2)$$

En las figuras 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, y 6.17, se representan el FIT de cada profundidad de fisura frente a la posición relativa (γ) para los casos 4, 5 y trabajo de referencia.

Tabla 6. 3.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.5$.

Posición relativa en el frente de fisura (γ)	FIT del trabajo de referencia [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 4 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 5 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	Error Caso 4 (%)	Error Caso 5 (%)
0.83	1.054169	1.03769	1.058572	1.563227	0.417705
0.66	1.12499	1.121365	1.127110	0.32164	0.188463
0.5	1.162042	1.159358	1.162809	0.231017	0.066005
0.33	1.18361	1.179187	1.183113	0.352759	0.02099
0.16	1.196273	1.9049	1.193831	0.483455	0.204142
0	1.199375	1.194145	1.197146	0.436055	0.185887
-0.16	1.196273	1.190489	1.193821	0.483502	0.204972
-0.33	1.183361	1.179186	1.183097	0.352819	0.022333
-0.5	1.162042	1.159358	1.162805	0.231017	0.065663
-0.66	1.12499	1.121368	1.12713	0.321938	0.190229
-0.83	1.054169	1.037694	1.058616	1.56285	0.421852

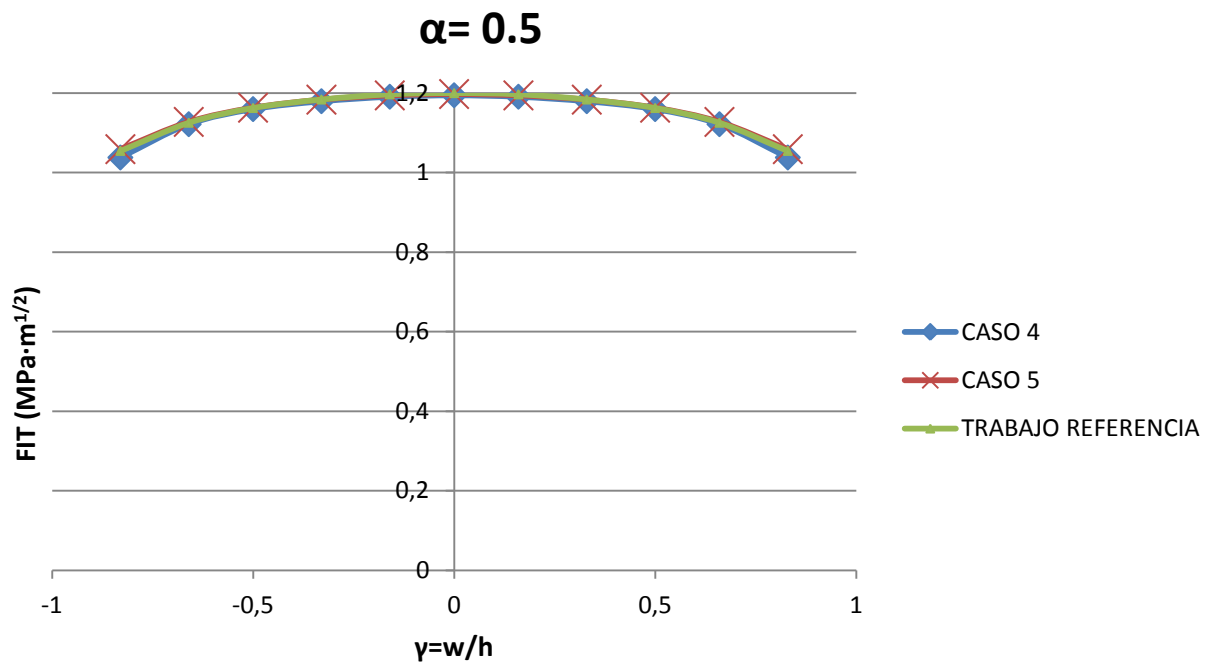


Figura 6. 13.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha=0.5$.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Tabla 6. 4.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.4$.

Posición relativa en el frente de fisura (γ)	FIT del trabajo de referencia [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 4 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 5 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	Error Caso 4 (%)	Error Caso 5 (%)
0.83	0.841485	0.820649	0.843847	2.476066	0.280642
0.66	0.912507	0.916667	0.915471	0.455904	0.324777
0.5	0.949988	0.960029	0.953358	1.057026	0.354758
0.33	0.971608	0.982926	0.975205	1.164887	0.370187
0.16	0.983163	0.996036	0.986855	1.309309	0.375552
0	0.98682	1.000691	0.99053	1.405692	0.375962
-0.16	0.983163	0.996036	0.986842	1.309309	0.374197
-0.33	0.971608	0.982925	0.975183	1.164741	0.3679
-0.5	0.949988	0.960029	0.953338	1.057026	0.352654
-0.66	0.912507	0.916667	0.915458	0.455904	0.323316
-0.83	0.841485	0.820651	0.843847	2.475897	0.280642

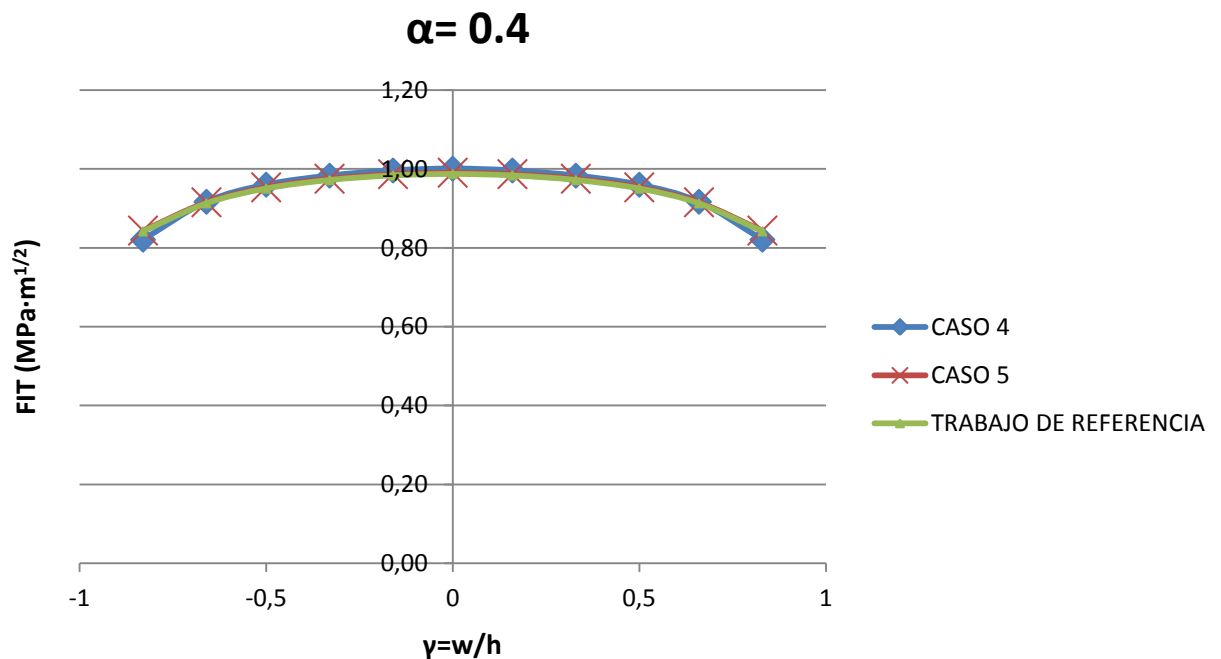


Figura 6. 14.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha=0.4$.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Tabla 6. 5.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.3$.

Posición relativa en el frente de fisura (γ)	FIT del trabajo de referencia [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 4 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 5 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	Error Caso 4 (%)	Error Caso 5 (%)
0.83	0.721705	0.702964	0.723465	2.59681	0.243837
0.66	0.803101	0.80263	0.805231	0.058646	0.26512
0.5	0.847106	0.848733	0.849461	0.191993	0.277996
0.33	0.872841	0.873911	0.875299	0.122615	0.281556
0.16	0.886683	0.888333	0.889182	0.186016	0.28179
0	0.891116	0.893476	0.893625	0.264843	0.281539
-0.16	0.886683	0.88833	0.889172	0.186016	0.280632
-0.33	0.872846	0.873911	0.875283	0.122026	0.279203
-0.5	0.847111	0.848733	0.849446	0.191386	0.275572
-0.66	0.803106	0.80263	0.805215	0.059284	0.262563
-0.83	0.721709	0.702693	0.723455	2.597363	0.241845

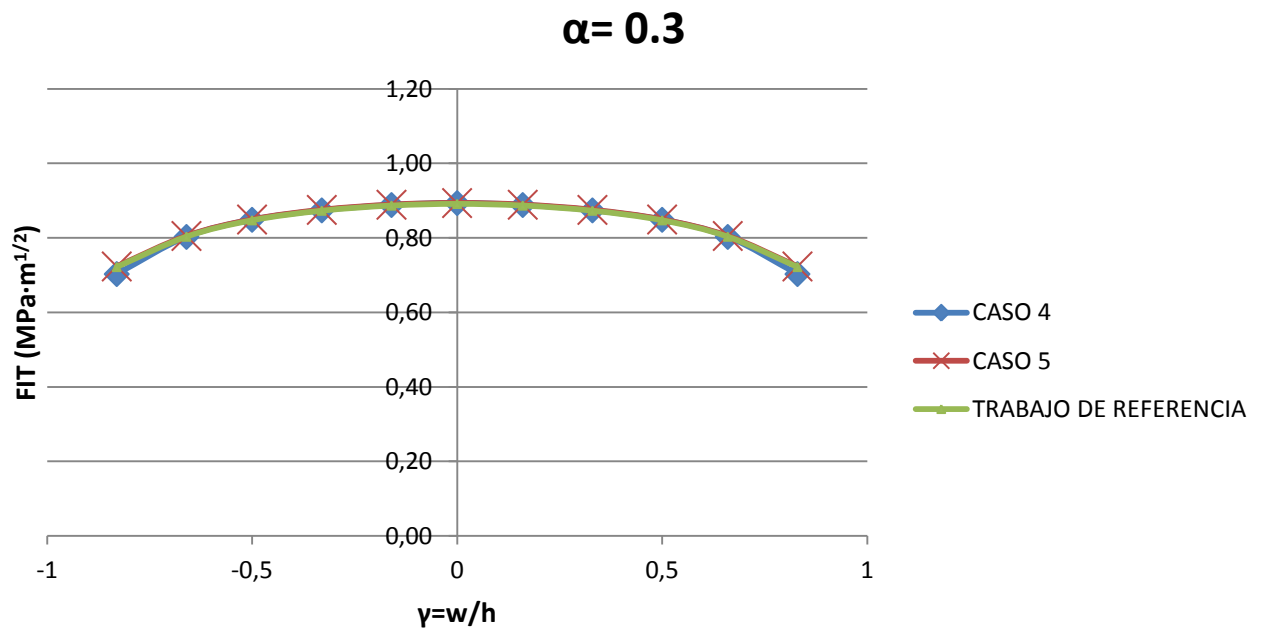


Figura 6. 15.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha=0.3$.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Tabla 6. 6.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.2$.

Posición relativa en el frente de fisura (γ)	FIT del trabajo de referencia [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 4 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 5 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	Error Caso 4 (%)	Error Caso 5 (%)
0.83	0.65963	0.63915	0.661452	3.104672	0.276254
0.66	0.758942	0.758514	0.760928	0.0566366	0.261631
0.5	0.813993	0.815344	0.816035	0.165969	0.250884
0.33	0.846662	0.847307	0.848735	0.076176	0.244914
0.16	0.864325	0.865534	0.866411	0.139845	0.241363
0	0.870024	0.872035	0.872117	0.231115	0.240504
-0.16	0.864319	0.865534	0.866402	0.140573	0.241002
-0.33	0.846655	0.847307	0.848716	0.076919	0.243432
-0.5	0.813987	0.815344	0.816004	0.166743	0.247798
-0.66	0.758942	0.758514	0.760903	0.056366	0.258319
-0.83	0.65693	0.639151	0.661433	3.104611	0.273396

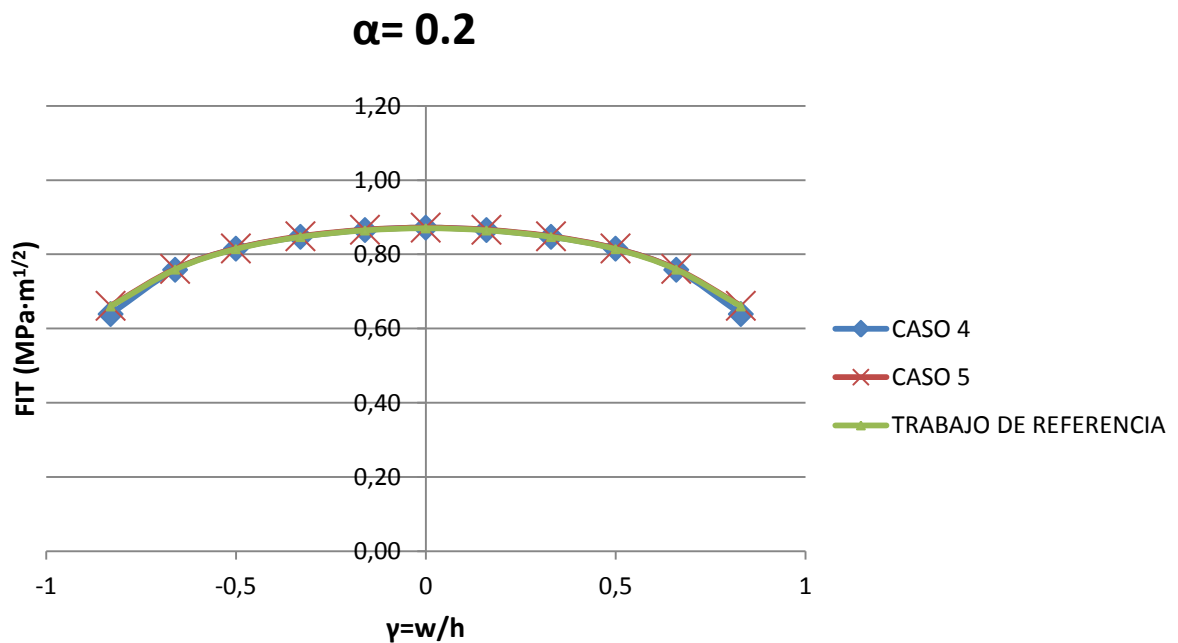


Figura 6. 16.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha=0.2$.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

Tabla 6. 7.- Comparación del FIT y error relativo para $\alpha=0.1$.

Posición relativa en el frente de fisura (γ)	FIT del trabajo de referencia [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 4 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	FIT del caso 5 [$MPa \cdot m^{1/2}$]	Error Caso 4 (%)	Error Caso 5 (%)
0.83	0.644267	0.617508	0.642355	4.1535	0.296757
0.66	0.777808	0.772754	0.776141	0.649867	0.214331
0.5	0.852228	0.8504	0.850808	0.214436	0.166575
0.33	0.896201	0.89439	0.894966	0.202088	0.137827
0.16	0.920425	0.918408	0.919145	0.219122	0.139027
0	0.928832	0.927561	0.927445	0.136812	0.149249
-0.16	0.920425	0.918473	0.919003	0.212113	0.154474
-0.33	0.896201	0.894418	0.894974	0.198975	0.136836
-0.5	0.852228	0.850389	0.85081	0.21574	0.166315
-0.66	0.777808	0.772779	0.776124	0.646583	0.216559
-0.83	0.644267	0.617434	0.642262	4.164923	0.311308

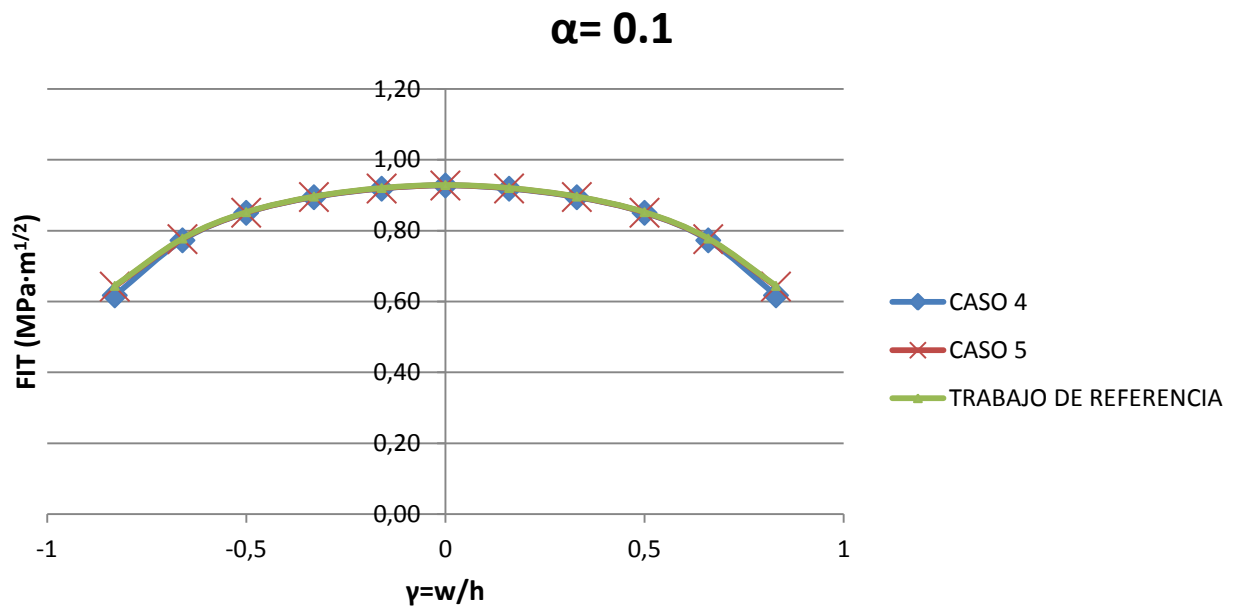


Figura 6. 17.- Comparación del FIT-Posición relativa en el frente de fisura (γ), para el Caso 4,5 y Trabajo de referencia, con profundidad de fisura $\alpha=0.1$.

Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado

En las figuras y tablas anteriores se puede observar como los valores del FIT en el caso 4 y 5, son muy cercanos al de los valores del trabajo de referencia. Al representar estos valores del FIT, frente a la posición relativa en el frente de fisura (y), se aprecia como las gráficas son prácticamente iguales.

Para poder encontrar una cierta diferencia entre los resultados, es necesario recurrir al error de cada uno de ellos. Analizando los errores, se puede afirmar que el caso 5 es más preciso que el caso 4, puesto que para todas las profundidades de fisura, el mayor error cometido ocurre en el caso 4. Sin embargo, cabe destacar, que en muchos puntos a lo largo del frente de fisura, el error cometido en el caso 4 es inferior que los cometidos en el caso 5.

Con todo esto, se considera que tanto el caso 4 como el caso 5 son válidos. Puesto que a pesar de que existe un mayor error en los resultados en el caso 4, los errores en los dos casos son muy bajos y el caso 4 conlleva un menor tiempo de cálculo. Dado esto, los dos están dentro de los límites resultado-tiempo, por lo que se consideran correctos ambos modelos.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. Conclusiones

Al analizar todos los resultados expuestos hasta ahora, se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo marcado al inicio del presente proyecto. Se consigue reducir el tiempo de cálculo en un caso estático, de una hora hasta 5-15 minutos, manteniendo unos resultados semejantes a los que se consideran como válidos [2].


Se ha observado que tanto en el caso 4 como en el 5 los resultados se ajustan en gran medida al caso de referencia. Además, como se ha comentado anteriormente el tiempo de cálculo es muy inferior, por lo que ambos se consideran válidos y se utilizarán para trabajos futuros.

7.2. Trabajos futuros

Los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto son importantes de cara a posibles trabajos futuros. El hecho de conseguir reducir el tiempo de cálculo, permite y da la posibilidad de usar los modelos creados en el presente trabajo, para un posible estudio dinámico.

Como se comentó anteriormente, el análisis de un eje en régimen dinámico conlleva un mayor tiempo de cálculo, que en un caso estático. Al reducir el tiempo de análisis en 5-15 minutos, permitirá realizar ensayos en casos dinámicos con mayor rapidez, y por lo tanto permitirá realizar mayor número de pruebas.

8. PRESUPUESTO

		UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID Escuela Politécnica Superior			
PRESUPUESTO DE PROYECTO					
1.- Autor: Javier Montero García					
2.- Departamento: Ingeniería Mecánica					
3.- Descripción del Proyecto:					
- Título	Optimización del mallado de un modelo de un eje fisurado.				
- Duración (meses)	5				
Tasa de costes Indirectos:	20%				
4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):					
22.259 Euros					
5.- Desglose presupuestario (costes directos)					
PERSONAL					
Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)
Rubio Ruiz de Aguirre, Lourdes		Ingeniero Senior	1	4.289,54	4.289,54
Montero García, Javier		Ingeniero	5	2.694,39	13.471,95
Hombres mes 6				Total	17.761,49
^{a)} 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas) Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)					
EQUIPOS					
Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
Ordenador de calculo	1.500,00	90	5	60	112,50
Licencias de Abaqus	9.000,00	90	5	60	675,00
Ordenador personal	600,00	10		60	0,00
Paquete Microsoft Office	110,00	10		60	0,00
				Total	787,50
^{d)} Fórmula de cálculo de la Amortización: $\frac{A}{B} \times C \times D$ <p> A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado B = periodo de depreciación (60 meses) C = coste del equipo (sin IVA) D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%) </p>					
SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS					
Descripción	Empresa	Coste imputable			
		Total 0,00			
OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO ^{e)}					
Descripción	Empresa	Costes imputable			
		Total 0,00			
^{e)} Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas,					
6.- Resumen de costes					
Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales				
Personal	17.761				
Amortización	788				
Subcontratación de tareas	0				
Costes de funcionamiento	0				
Costes Indirectos	3.710				
Total	22.259				

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.mecapedia.uji.es/fatiga.htm> (último acceso Junio 2013).
- [2] P. Rubio, *“Estudio temporal del factor de intensidad de tensiones en un eje fisurado”*, Proyecto Fin de Máster (2012).
- [3] A. Martín, y J. M. Martínez, *“Mecánica de la fractura”*, Tecnun, Universidad de Navarra (1999).
- [4] A. A Griffith, *“The phenomena of rupture and flow in solids*, Philosophical Transactions”, Series A, 221 (1920), 163-198.
- [5] G. R. Irwin, *“Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate”*, Journal of Applied Mechanics, ASME, 24 (1957), 361-364.
- [6] http://www.ehu.es/argitalpenak/images/stories/libros_gratuitos_en_pdf/Ciencia_y_Tecnologia/Mecanica20de20fractura.pdf (último acceso Junio 2013).
- [7] http://materias.fi.uba.ar/6716/Mecanica20de20fractura20lineal2020elastica_1.pdf (último acceso Junio 2013).
- [8] ABAQUS Inc. (2004): *ABAQUS/CAE User's Manual (versión 6.5)*, United States of America.
- [9] A. Carpinteri, *“Surface flaws in cylindrical shafts under rotary bending”*, Fatigue Fracture of Engineering Materials, 21 (1998), 1027-1035.
- [10] M. Buesa, *“Factor de intensidad de tensiones para fisuras semielípticas en ejes cilíndricos bajo flexión rotativa”*, Proyecto Fin de Carrera (2012).
- [11] M. Ruiz, *“Estudio del comportamiento a flexión de ejes con fisuras de frente semielíptico”*, Proyecto Fin de Carrera (2010).